



Vysoká škola báňská technická univerzita Ostrava

Ostrava University of technology

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství

Faculty of metallurgy and material engineering

Department of Material Engineering



TEPELNÉ VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

THERMAL PROPERTIES OF SANDWICH STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. Jakub Tretíník

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

prof. RNDr. Pavol Košťál, CSc.

SUPERVISOR

OSTRAVA 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálového inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Tretiník**
Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911T031 Diagnostika a design materiálů
Téma: **Tepelné vlastnosti sendvičových struktur**
Thermal properties of sandwich structures

Zásady pro vypracování:

Literární přehled problematiky
Přehled experimentálních metod
Měření tepelných vlastností sendvičových struktur
Vyhodnocení a analýza výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:


Korínek, Z.: Kompozity – skriptum, <http://www.volny.cz/zkorinek>.
Ehrenstein, G., W.: Polymerní kompozitní materiály, Scientia, Praha 2009.
Wanberg, J.: Composite materials, Wolfgang publication Inc., 2010.

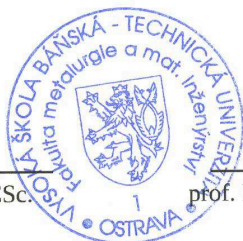
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Pavol Košťál, Ph.D.**

Datum zadání: 29.11.2013

Datum odevzdání: 09.05.2014


prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry. Měl by korespondovat s podobou vnějších desek (viz část III) doplněnou o název práce, umístěný nad spojením *DIPLOMOVÁ PRÁCE*.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení je napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a je vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listu vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. jedné strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listu. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2013/2014. Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru.

Ostrava 22. 11. 2013

Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 7.5. 2019

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Vladimíru Rusnákovi za poskytnutí vzorků pro měření mé diplomové práce. Dále panu Prof. RNDr. Pavolu Košťalovi, PhD. za pomoc, rady a odborné vedení při tvorbě této práce. Děkuji i paní laborantce Naděždě Brychtové za její ochotu při získání detailních snímků vzorků a také za čas panu doc. Mgr. Ivanu Kopalovi, PhD., který mi věnoval při mé odborné praxi, jež jsem u něj absolvoval.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá Tepelnými vlastnostmi sendvičových struktur. Byla zkoumána měrná tepelná kapacita, teplotní vodivost a vodivost tepelná pěti vzorků. Teoretická část poskytuje informace ohledně kompozitních materiálů, struktury zkoumaných sendvičů a teoretických východiscích k měření tepelných parametrů pevných látek pomocí modelu soustředěné tepelné kapacity. Část experimentální popisuje měřící aparaturu, stanovení jednotlivých měřených veličin a hodnotí získané výsledky tepelných vlastností.

Abstract

This thesis deals with the thermal properties of sandwich structures. Specific heat capacity, thermal conductivity and heat conductivity of five samples were investigated. The theoretical part provides informations about composite materials, structures examined sandwiches and theoretical bases for measuring thermal parameters of solids using lumped capacitance model. The experimental part describes the measuring apparatus, the determination of individual measured variables and evaluate the results of thermal properties.

Klíčová slova

sendvičová struktura, tepelné vlastnosti, měrná tepelná kapacita, teplotní vodivost, tepelná vodivost

Keywords

sandwich structure, thermal properties, specific heat capacity, diffusivity, thermal conductivity

Obsah

1	ÚVOD	10
2	TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1	Kompozity	12
2.1.1	Obecná charakteristika	12
2.1.2	Charakteristiky výztuže	13
2.1.3	Charakteristiky matic	15
2.1.4	Struktura a vlastnosti vláknových kompozitů	15
2.2	Prepregy	18
2.3	Semipregy	21
2.4	Sendviče	23
3	ZKOUMANÉ VZORKY	25
3.1	Struktury sendvičů	25
3.2	Popis vlastností použitých sendvičových struktur	30
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	40
4.1	Teoretické východiska k měření tepelných parametrů pevných látek pomocí modelu soustředěné tepelné kapacity	40
4.2	Popis konstrukce aparatury na měření tepelných parametrů pevných látek	44
4.3	Určování c_p a h	51
4.4	Určování k a α	52
4.5	Výhody a nevýhody aparatury	52
4.6	Prověření aparatury	52
5	STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT	53
5.1	Typy nejistot	54

5.2	Vyhodnocení standardních nejistot vstupní veličiny metodou typu A	54
5.3	Vyhodnocení standardních nejistot vstupní veličiny metodou typu B	55
5.4	Kombinovaná a rozšířená nejistota	55
5.5	Interval spolehlivosti.....	56
5.6	Přesnost výběrového průměru – výběrová směrodatná odchylka	57
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH ZHODNOCENÍ.....	58
7	ZÁVĚR	61
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	63

1 ÚVOD

Zlepšení výkonnosti letadel ale i vojenského materiálu je prvořadým cílem pro designéry. Návrháři se snaží postavit vojenskou techniku, která je lehká, má vylepšený výkon a současně jsou nízké pořizovací ceny i náklady na životní cyklus. Nedávné vývoje v oblasti struktur a materiálových technologií spolu s pokroky v pohonu a systémech řízení letu, vedly k pokroku výkonů letadel a vojenské techniky. Aktuální vojenská výzbroj má větší spolehlivost a nízké náklady na údržbu.

Mezi hlavní faktory, které přispívají ke zlepšení výkonnosti vojenské techniky patří pokročilé materiály a nové konstrukční koncepce. Díky novým materiálům, jako jsou kompozity a sendvičové struktury jsou konstrukce techniky lehčí a zároveň s vynikajícím výkonem.

Vývoj kompozitních materiálů za několik posledních desetiletí ovlivnil všechny oblasti lidského života, ať už civilní nebo vojenské. Ve vojenství najdou uplatnění kompozitní materiály téměř v každých leteckých konstrukcích, lodích, tancích a námořních prostředcích. Na civilní straně nachází kompozity využití u mostů, sportovních potřebách, opravě stávajících ocelových a betonových konstrukcí, zlepšení odolnosti stávajících konstrukcí vůči zemětřesení apod. [1].

Stále širší používání kompozitních materiálů je jedním z charakteristických rysů moderní doby, které přináší v klasické oblasti inženýrského konstruování a nejen v ní skutečnou revoluci. V běžné konstruktérské praxi se doposud využívaly a využívají kovové materiály (zejména ocel), které mají homogenní izotropní materiálové a pevnostní vlastnosti. Při pevnostním návrhu konstrukce či mechanické součástky se vybírá použitý materiál tak, aby jeho pevnostní a případně další materiálové charakteristiky odpovídaly místu maximálního namáhání. Z pevnostního pohledu je potom materiál využit pouze v této oblasti, což může být značně neefektivní. Technologie kompozitních materiálů umožňuje vytvořit strukturu, která odpovídá poli napjatosti (či deformace) a která je vysoce pevná tam, kde je vysoké namáhání (resp. vysoce tuhá tam, kde je to vyžadováno) a jinde již takové vlastnosti nemá. Moderní kompozitní materiály mají celou řadu předností ve srovnání s běžnými kovovými konstrukčními materiály - nízká hustota, větší měrná pevnost, lomová houževnatost, odolnost vůči chemickým a povětrnostním vlivům, lepší tepelné a elektroizolační vlastnosti, dobrá prostupnost elektromagnetickým zářením, často snadnější technologie výroby atd.

Je možné s určitou nadsázkou také říci, že historie využívání kompozitních materiálů (sendvičových struktur) je stejně stará jako lidstvo samo. Již při konstrukci prvních obydlí se používala hlína vyztužená slámou nebo rákosem, známým stavebním prvkem byly cihly vyztužené slámou, překližka byla již známa v dávném Egyptě. V té době se samozřejmě pro stanovení optimálního složení nepoužívaly sofistikované výpočetní metody. Vycházelo se z intuice a z praktických zkušeností [2].

Cíle této diplomové práce jsou zformulovány do následujících bodů:

- Literární přehled problematiky.
- Přehled experimentálních metod.
- Měření tepelných vlastností sendvičových struktur.
- Vyhodnocení a analýza výsledků.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Kompozity

2.1.1 Obecná charakteristika

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky rozdílných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a zpravidla poddajnější složka, která plní funkci pojiva výztuže, se nazývá se matrice.

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různorodých rozměrů. Ve strojírenství mají největší důležitost mikrokompozitní materiály, u kterých se největší příčné rozměry výztuže pohybují v rozmezí 10^0 až $10^2 \mu m$. Makrokompozity jsou používány zejména ve stavebnictví (železobeton vyztužený ocelovými pruty, polymerbeton obsahující drcené kamenivo a písek, apod.). Nanokompozity obsahují částice, jejichž největší rozměr je v nm .

Jiné dělení mikrokompozitů je možné podle materiálu matrice, která může být:

- polymerní
- kovová
- uhlíková
- skleněná
- sklokeramická
- keramická

Dle tvaru výztuže dělíme mikrokompozity (dále jen kompozity) na dvě hlavní skupiny:

1. vláknové kompozity

- a) s kontinuálními vlákny
- b) s krátkými vlákny

2. částicové kompozity

- a) sférické částice (izometrické)

b) destičkovité částice (anizometrické)

2.1.2 Charakteristiky výztuže

Vlákna jsou vždycky daleko pevnější než stejné materiály v kompaktní podobě (tab. 2.1.). Pevnost vláken se zvyšuje se zmenšujícím se průřezem, jelikož přirozené defekty struktury jsou u vláken malých průměru také malé a navíc příznivě orientované svým delším rozměrem ve směru osy vlákna. Pevnost vlákna závisí rovněž na jeho délce. Části vzniklé porušením vlákna při tahovém namáhání vykazují větší pevnost než vlákno původní, poněvadž k prvnímu lomu došlo z největšího defektu vlákna. Majoritní část vyráběných vláken má kruhový průřez o průměru od 5 do 20 μm . Menší průměry se nepoužívají z technologických příčin - produkty s velice tenkými vlákny se obtížně prosycují matricemi [3].

Tab. 2.1. Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů [4]

Materiál	modul pružnosti [GPa]	pevnost v tahu [MPa]
skleněné vlákno typu E	73	2500
sklovina E	73	100
uhlíkové vlákno	230 až 950	2000 až 6000
polykrystalický grafit	10	20
keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
UHMW polyethylenové vlákno	90 až 170	3000
lineární polyethylen	0,4	26

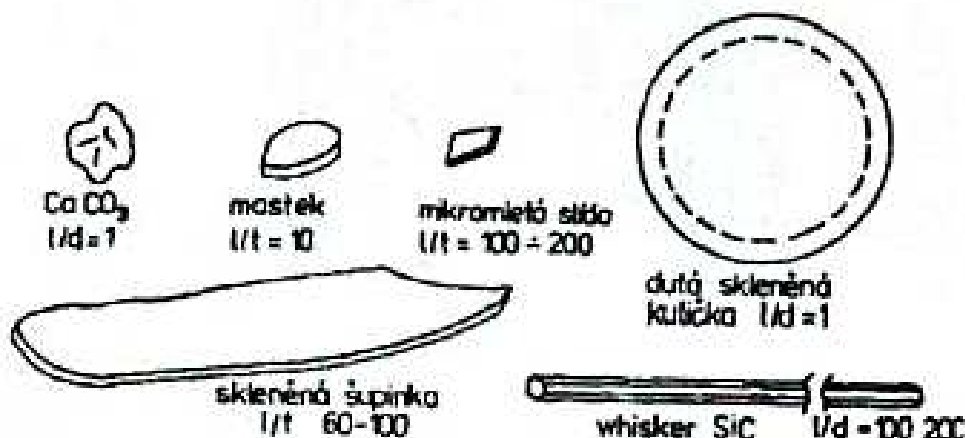
- Pro kompozity jsou vyráběna vlákna:
- skleněná
- uhlíková
- polymerní
- keramická
- kovová

Všechna vlákna se dodávají navinutá na válcovité cívce (roving) či v podobě textilií. Polymerní matrice se nevyztužují kovovými nebo keramickými vlákny nikoli jen

z cenových důvodů, ale rovněž proto, že jde o vlákna s větší hustotou. Pro kovové a keramické matrice zase nelze použít vlákna s malou chemickou a tepelnou odolností. Rozlišují se tedy vlákna pro polymerní matrice (skleněná, uhlíková a polymerní) a vlákna pro vysokoteplotní aplikace (uhlíková, keramická a kovová).

Částice se přidávají do polymerních matric proto, aby zvětšily tuhost. Částice sférického tvaru by neměly být příliš velké, aby negativně neovlivňovaly pevnost, ale ani přespříliš jemné, protože poté je obtížné dosáhnout jejich rovnoměrného rozptýlení. Nejvhodnější částice s rozměry v rozmezí 1 až 10 μm , jsou považovány za tzv. velké částice. Anizometrické částice (tvar destiček, jehlic, disků) mohou matrice nejen vyztužovat, ale také významně zpevňovat - jsou to tzv. aktivní částice. Poměr největšího rozměru částice k minimálnímu rozměru (u destičkovitých částic tloušťka) udává aspektivní (štíhlostní) poměr.

Největší aspektivní poměry mají vlákna krátká a whiskery s poměrem délky k průměru až 200. Whiskery mají na rozdíl od krátkých vláken jednu výhodu - vzhledem k vysoké tahové pevnosti a malým příčným rozměrům (0,1 až 1 μm) nedochází při ohybovém namáhání, kterému jsou vystaveny při přípravě kompozitu, k jejich lámání. Na obr. 2.1. jsou zobrazeny částice pro vyztužení polymerních matric a *whisker SiC* [4].



Obr. 2.1. Tvary a rozměry částic používaných k vyztužení kompozitu s polymerní matricí

[4]

2.1.3 Charakteristiky matric

Klíčovým úkolem matrice je spojovat vyztužující fázi a chránit ji před vlivy okolí. Funkci pojiva by si měla udržet matrice i po prvních závadách vláknové výztuže. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení vláken. Tento nárok avšak splňují pouze polymerní a kovové matrice. Keramické, skelné, sklokeramické i uhlíkové matrice mají mezní prodloužení při lomu menší než vlákna. Na obr. 2.2. jsou schematicky znázorněny křivky napětí - poměrné prodloužení odlišných matric v porovnání s chováním uhlíkového vlákna [4].

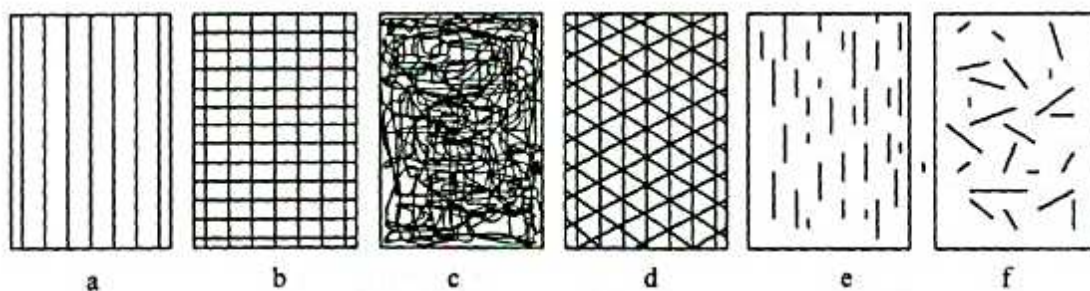


Obr. 2.2. Schematické znázornění rozdílů v křivkách napětí - poměrné prodloužení různých matric v porovnání s chováním standardního uhlíkového vlákna [4]

Nejsnadněji se kompozity připravují, jestliže-li lze matrici převést do kapalného stavu. K základním charakteristikám kapalného stavu, které ovlivňují technologii přípravy kompozitu, patří povrchová energie a viskozita. Podmínkou dobré smáčivosti výztuže je, aby pro výztuž s vysokou povrchovou energií měla kapalná matrice povrchovou energii co nejmenší.

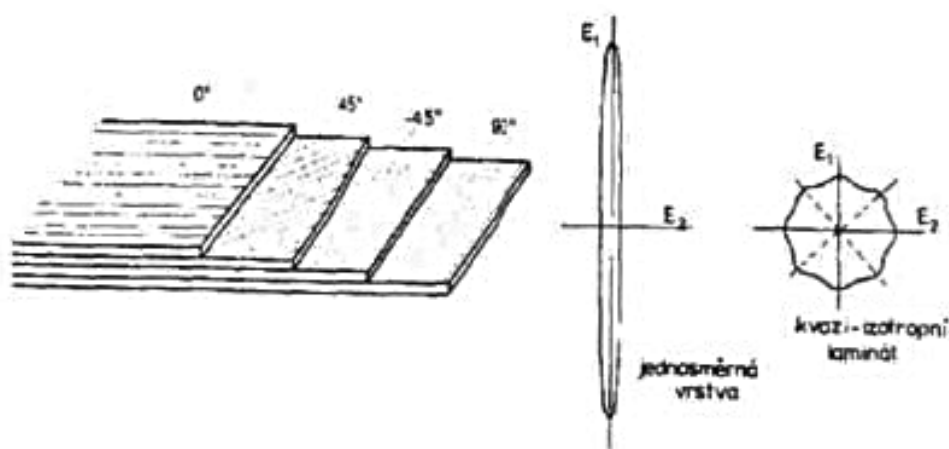
2.1.4 Struktura a vlastnosti vláknových kompozitů

Kompozity s kontinuálními vlákny mohou mít výztuž orientovanou jednosměrně, dvouose, víceose nebo náhodně uspořádanou. Rovněž krátká vlákna a *whiskery* mohou být orientovány přednostně nebo nahodile. Ukázky uspořádání vláknové výztuže je na obr. 2.3.



Obr. 2.3. Příklady uspořádání vláknové výztuže v kompozitech [4]: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací.

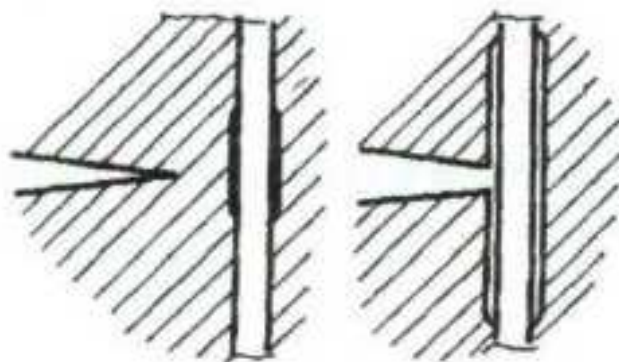
Potřebná tloušťka stěny kompozitních dílů vyztužených kontinuálními vlákny se zpravidla vytváří z elementárních vrstev. Vytvoří se tak laminát s vlastnostmi závislými na orientaci vláken v jednotlivých vrstvách. Jsou-li vlákna v elementární vrstvě jednosměrně orientována, stává se laminát prakticky izotropní, tzv. kvazi-izotropní, teprve při skladbě vrstev (obr. 2.4.).



Obr. 2.4. Skladba laminátu vyrobeného z jednosměrně vyztužených vrstev. Vpravo je v polárních souřadnicích znázorněna anizotropie modulu pružnosti v rovině jedné vrstvy a téměř dokonalá izotropie laminátu se skladbou $[0/+45/-45/90]$. Číslo označuje úhel, pod kterým jsou vlákna v jednotlivých vrstvách orientována [4].

Lamináty se zpravidla navrhují symetrické kolem střední roviny nebo střední vrstvy. Při namáhání tahovými silami působícími v rovině laminátu nedochází u symetrického laminátu k přídavným ohybovým nebo torzním deformacím a je tím zaručena tvarová stabilita laminátu při změnách okolní teploty.

Význačnou vlastností vláknových kompozitu je fakt, že negativní mechanické vlastnosti složek se u výsledného materiálu neprojevují. Kompozit obsahující křehká vlákna uložená v křehké matrici má dobrou odolnost proti křehkému lomu. Oproti homogennímu materiálu mohou být poruchy vláken i matrice početnější a přesto nevedou ke katastrofickému lomu. Příčinou je různý mechanismus šíření poruch. Při rozšiřování trhlin v matrici ve směru kolmém k osám vláken dochází k otupování vrcholů trhlin mechanismem znázorněným na obr. 2.5. Trhlina se po interakci s vláknem šíří po mezifázovém rozhraní [4].



Obr. 2.5. Mechanismus interakce trhliny matrice s vláknem [4]

Kompozit získá lepší vlastnosti, než by odpovídalo průměru odvozenému z vlastností složek. Jde o tzv. *synergický efekt* (synergismus = spolupůsobení několika složek vedoucí k zesílení účinku).

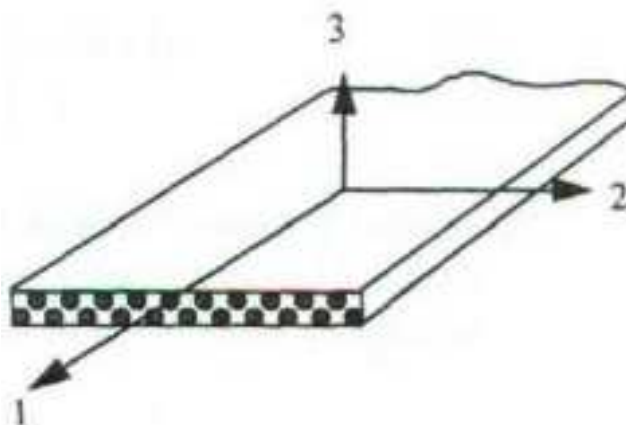
Mnoho kompozitních struktur je možno pokládat za systém elementárních vrstev vyztužených vlákny a vzájemně spojených jen matricí. Pomocí mikromechanických výpočtů lze určit tuhosti a pevnosti elementární vrstvy kompozitu.

Nejednodušší je výpočet vlastností vrstvy vyztužené jednosměrně uspořádanými vlákny (viz. obr. 2.6.).

Elastické konstanty orthotropní vrstvy jsou:

- modul pružnosti v tahu ve směru vláken E_1 ,
- modul pružnosti v tahu ve směru kolmém E_2 ,
- modul pružnosti ve smyku G_{12} ,

- poissonův poměr určovaný při jednoosém tahovém zatížení jako poměr příčné poměrné deformace k poměrnému prodloužení [4].



Obr. 2.6. Jednosměrně vyztužená (orthotropní) vrstva [4]

2.2 Prepregy

Jsou ploché útvary, jejichž hlavní složkou je výztuž předimpregnovaná pryskyřicemi, které jsou z části vytvrzené. Tyto listové polotovary lze na sebe vrstvit do požadované tloušťky a ve formách je pak dotvarovat a dotvrdit působením tepla eventuelně i tlaku (obr. 2.7.).

Prepregy lze dělit do 2 hlavních skupin:

1. tkaninové nebo jednosměrné „neplastické“ prepregy,
2. lisovací rohože – *SMC* (sheet moulding compounds).

Tzv. „neplastické“ prepregy jsou tvořeny tkaninami, jedno nebo vícesměrnými výztužemi na bázi skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken nebo hybridními tkaninami a jsou většinou impregnovány epoxidovými pryskyřicemi s rozličnými typy tužidel pro odlišné teploty vytvrzování a aplikace. Obsah výztuže je 50-70 %. Ve formě působením tepla případně tlaku již nemění rozměr. Jen je třeba při ukládání vyplnit celou plochu formy.

SMC prepregy jsou směsice sekaných, většinou skleněných vláken o délce 25-50 mm, polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic, vytvrzovacích složek, inertních plniv, termoplastických aditiv pro zlepšení tokových vlastností a snížení smrštění, pigmentů, vnitřních separátorů a zahušťovadel. Směs se nanáší kontinuálně na podložný pás s

polyetylenovou separační folií, která se také používá jako vrchní separační vrstva. Materiál se navíjí do rolí, které před expedicí dozrávají určitý čas při regulované teplotě, přičemž se pojivo částečně vytvrzuje do tzv. stavu *B*. Je pak schopno při vlastním zpracování za tepla a tlaku konečného vytvrzení.

Do formy se vkládá vsádka o požadovaném počtu vrstev *SMC*, která pokrývá cca 70 % plochy formy. Materiál se působením tepla a tlaku následně v průběhu několika minut rovnoměrně rozteče do celé dutiny formy (mohou být zabudovány i zálisky) a vytvrdí se.

Oba typy prepregů vykazují omezenou skladovatelnost – tkaninové prepregy s epoxidovou matricí několik týdnů až měsíců, *SMC* prepregy jenom několik týdnů. Doporučuje se skladování při 5-20 °C v originálních obalech. Při skladování v teplotách -18 °C se zřetelně prodlužuje doba skladovatelnosti. Před použitím je nicméně nutné prepreg uvést do pokojové teploty nebo mírně vyšší, aby jej bylo možno zpracovat.

Zvláštní skupinou předimpregnovaných materiálů jsou tzv. lisovací těsta – *DMC* (dough moulding compounds) a premixy – *BMC* (bulk moulding compounds), některé sypké. Jedná se o podobné složení, jako u *SMC*, ale výztužná vlákna mají délku 6 nebo 12 mm, jejich obsah je 20-60 %. Zpracovávají se lisováním za tepla a tlaku v kovových formách obzvláště na části dopravních prostředků a pro elektrotechnické aplikace [5].

Mezi hlavní výhody použití prepregů patří:

- snadné použití
- dobrá odolnost proti únavě
- kontrola tloušťky laminátu
- dobrá odolnost proti korozi
- kontrola objemového podílu vláken
- lepší shody a jakosti
- vysoký měrný modul a pevnost
- velmi nízký součinitel tepelné roztažnosti
- vylepšené vlastnosti tlumení vibrací.

Prepregy se stále více používají v klíčových oblastech aplikací:

- interiéry letadel a vlaků, komponenty leteckého průmyslu, podlahy letadel, nákladní lodě (obr. 2.8. a 2.9.),
- automobilové díly a komponenty, nářadí, balistické panely,
- A/C potrubní,
- odolné díly proti UV, sportovní potřeby, vysokoteplotní díly,
- *Honeycomb* a pěnové panely, nehořlavé lamináty,
- opěradla [5].



Obr. 2.7. Přednasycená prepreg tkanina [6]



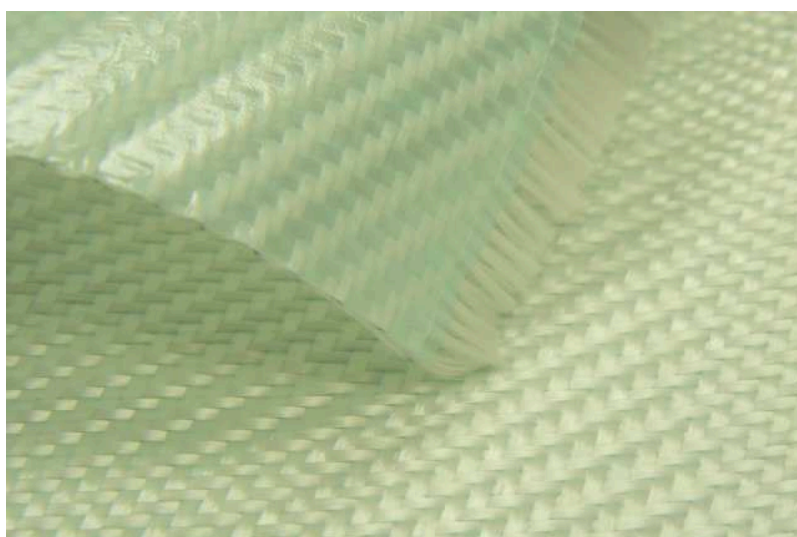
Obr. 2.8. Použití prepreg technologií v železničním průmyslu [6]



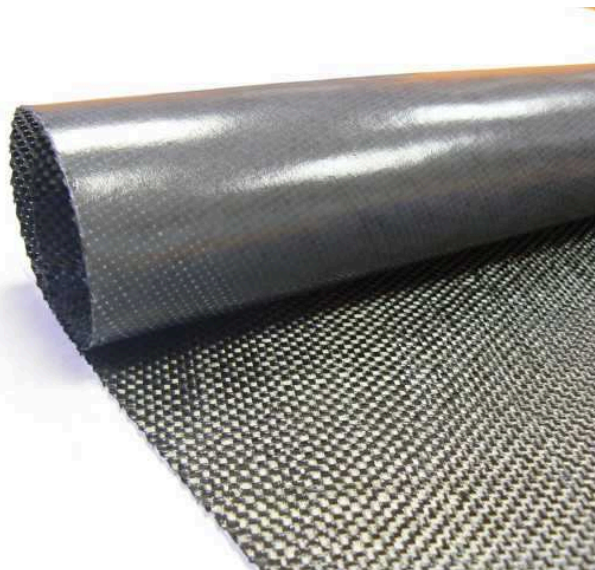
Obr. 2.9. Přednasycená prepreg tkanina při výrobě kolejových vozidel [6]

2.3 Semiprepregy

Ve světě kompozitů se už delší dobu používají přednasycené tkaniny všeobecně známé pod názvem prepreg. S ohledem na trvale rostoucí zájem o tento suchý způsob výroby laminátových výrobků se vyvinula alternativa, která zachovává všechny výhody práce s prepremem a přidává ještě něco navíc. Vzhledem k těsné vazbě na prepregovou technologii se alternativa pojmenovala semipreg. Semipreg je tkanina jednostranně impregnovaná foliovou pryskyřicí (obr. 2.10. a 2.11.) [7].



Obr. 2.10. Tkanina semipregu [8]



Obr. 2.11. Role semipreg [8]

Výhody:

- pro výrobu není zapotřebí autoklávu,
- v porovnání s klasickými prepregy neobsahují semipregy rozpouštědla a díky tomu se při zpracování a vytvrzování neodpařují žádné nebezpečné a těkavé látky,
- semipreg je tkanina impregnovaná z jedné strany fóliovou pryskyřicí *LETOXIT LFX*. Výsledkem je velká variabilita výsledné kompozice semipregu, protože lze vycházet ze široké nabídky pryskyřic *LETOXIT LFX*. Díky tomu lze nabídnout kromě základních typů i semipreg s vysokou teplotní odolností (250 °C), s vysokou rázovou houževnatostí nebo semipreg splňující podmínky standardů *FAR 23* a *FAR 25*.

Aplikace:

- letectví
- automobilový průmysl
- stavba lodí
- výroba sendvičových kompozitových konstrukcí
- zdravotnictví

- výroba sportovních potřeb

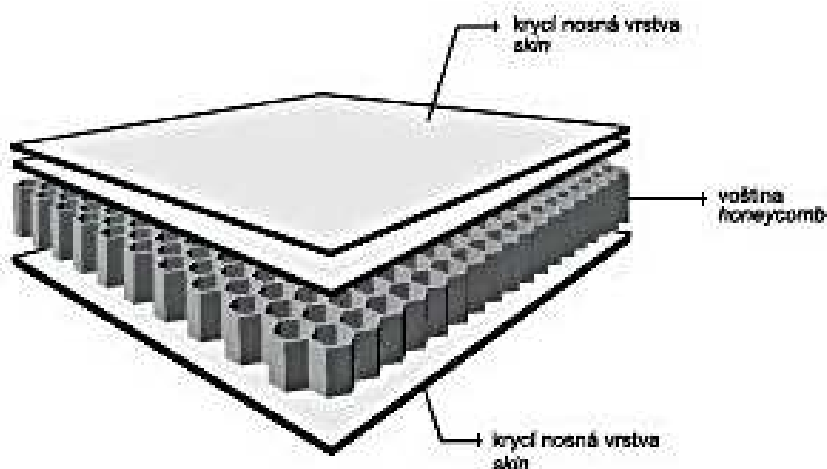
Semisendvičové struktury rovněž zvyšují tuhost kompozitních dílců, jádro je ale tvořeno netkanými nebo tkaninovými výztužemi vylehčenými expandovanými termoplastickými dutými mikrokuličkami. Vůči klasickým sendvičům musí být materiál jádra perfektně prosycen pryskyřicí, kterou jsou prosyceny i pláště tvořené rohožovým nebo tkaninovým laminátem [8].

2.4 Sendviče

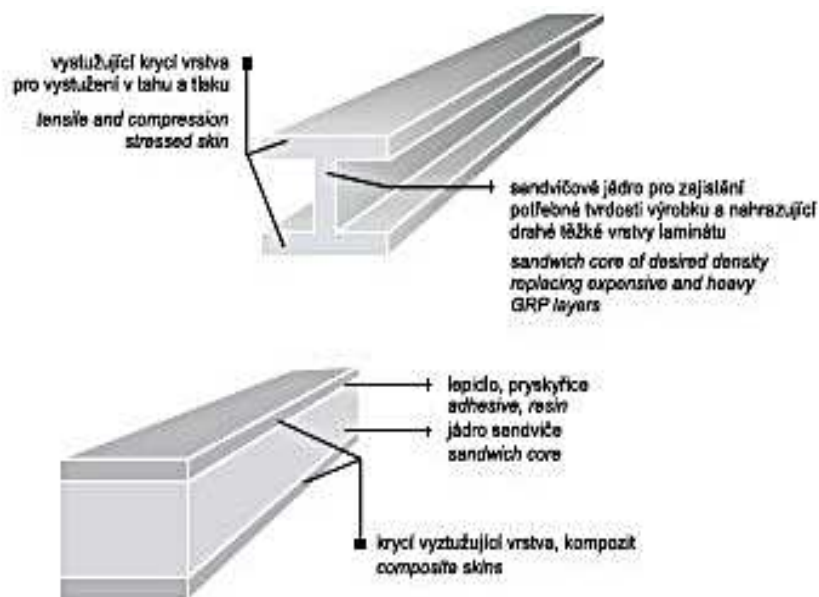
Sendvičové polymerní struktury se skládají z jádra ve středu a potahů (plášťů) na povrchu dílce (obr. 2.12.). Uplatňují se analogicky jako I kovové profily (obr. 2.13.) - jádro přenáší smyková zatížení z jednoho pláště (vnější stěny) na druhý (vnitřní stěna).

Jako jádra se nejčastěji používají:

- Voštiny z tenkého hliníkového plechu, Nomexu – aramidové tkaniny prosycené epoxidovou pryskyřicí, polypropylenu, ale také i papíru, prosyceného polyesterovou nebo fenolickou pryskyřicí.
- Tuhé pěny, nejčastěji na bázi polyuretanu, PVC, polystyrenu či polyeterimidu a polymetakrylimidu.
- Balza, lehké dřevo se speciální strukturou a orientací ligninových vláken.

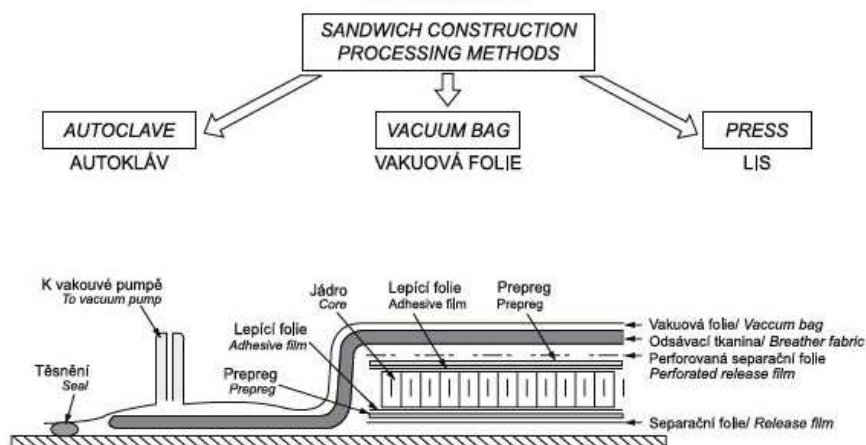


Obr. 2.12. Voštinový sendvič [9]



Obr. 2.13. Sendvičové materiály [9]

Potahy (pláště) jsou vlastně lamináty z rozličných pryskyřic a výztuží. Jádro a potahy pro optimální splnění funkce sendviče musejí být perfektně spojené za využití matrice potahů nebo aplikací speciálních lepidel. Vznikne tak velice tuhá konstrukce, odolávající dynamickému namáhání a rázům. Vytvořením polymerních sendvičových struktur lze získat lehké a současně velmi pevné, tuhé a rázuvzdorné kompozitní dílce, uplatňující se zejména v dopravních prostředcích (lodě, letadla, automobily a autobusy, kolejová doprava), lopatkách větrných elektráren a dalších průmyslových aplikacích. Sendviče mohou plnit i funkce tlumení zvuků a tepelné izolace. Výroba je znázorněna na obr. 2.14. [9].



Obr. 2.14. Výrobní metoda sendvičové struktury [9]

3 ZKOUMANÉ VZORKY

V následující kapitole se budeme věnovat vzorkům firmy *FORM s. r. o.*, které byly v této diplomové práci zkoumány.

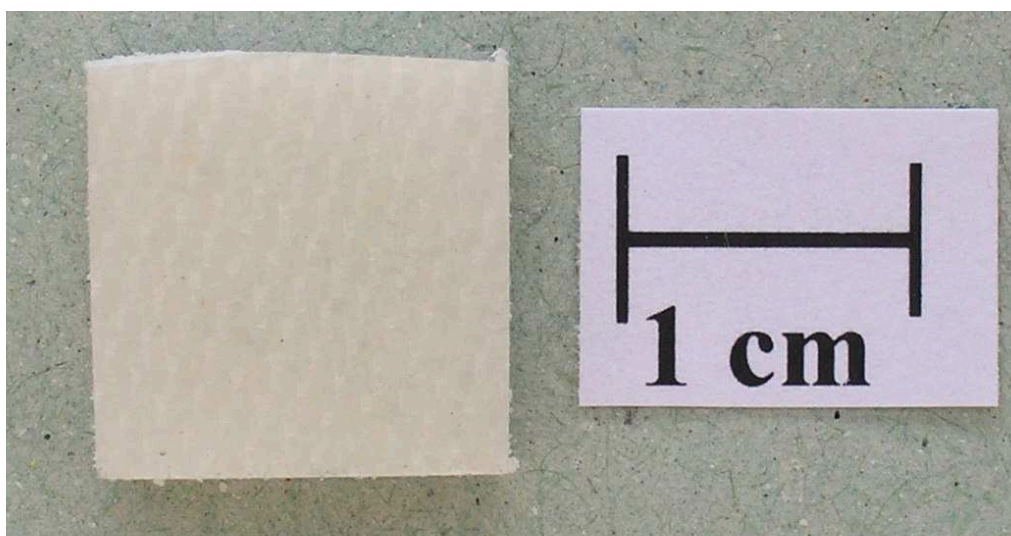
3.1 Struktury sendvičů

V této kapitole jsou zobrazeny fotografie vzorků sendvičových struktur.

- Kompozitní sendvičová struktura (vzorek č. 1) zobrazena na obr. 3.1. a 3.2.

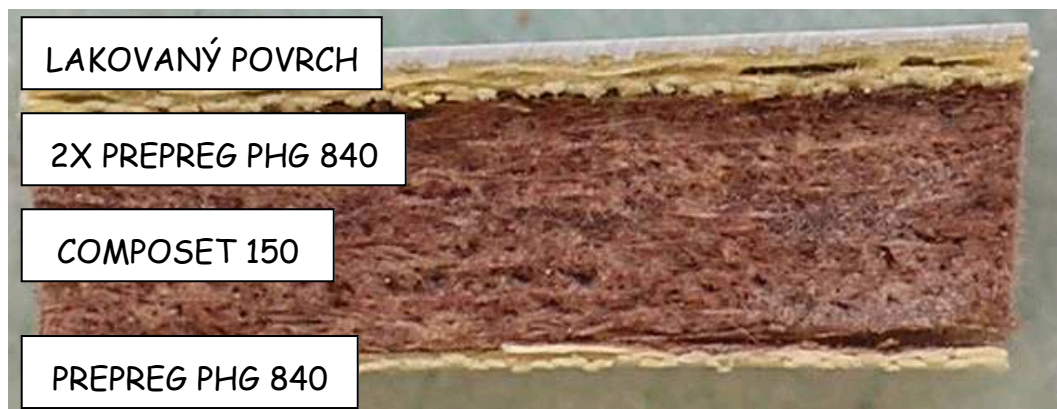


Obr. 3.1. Vzorek č. 1

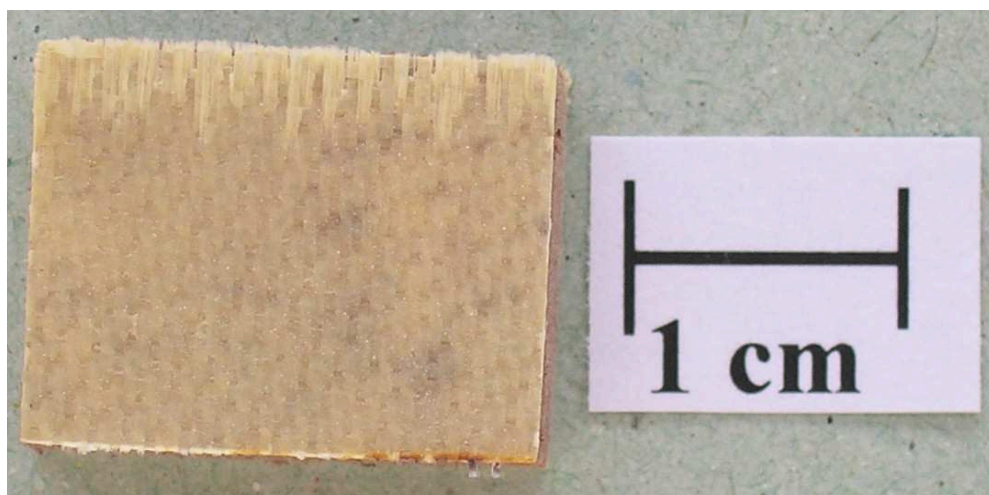


Obr. 3.2. Vzorek č. 1

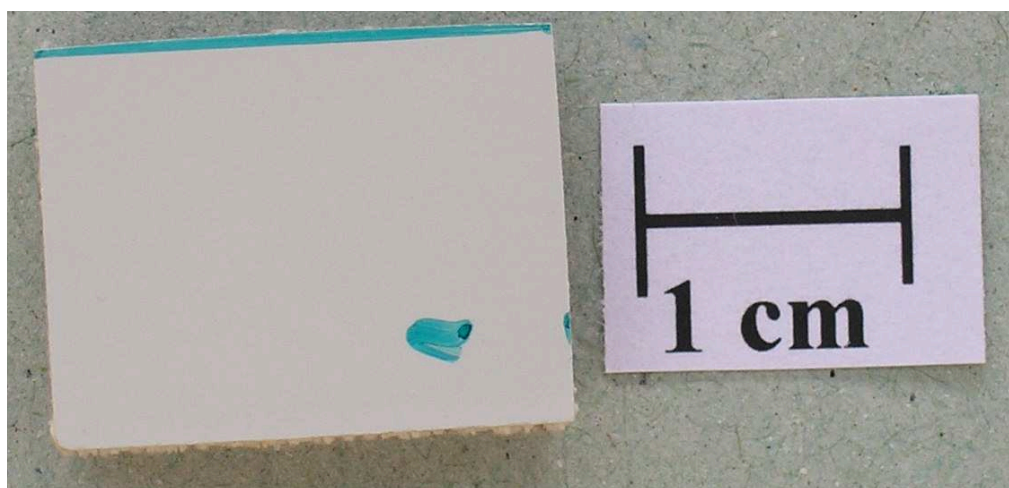
- Kompozitní sendvičová struktura (vzorek č. 2). Zachycena na obr. 3.3. až 3.5.



Obr. 3.3. Vzorek č. 2

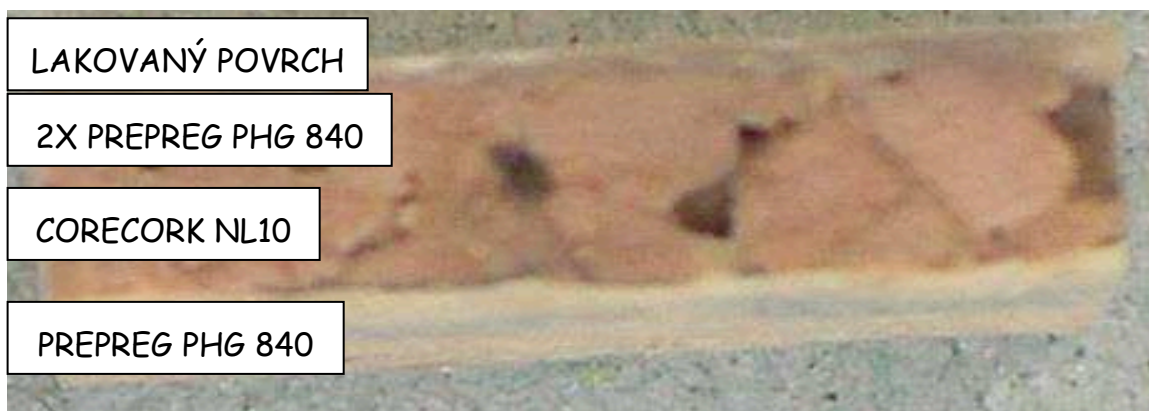


Obr. 3.4. Vzorek č. 2

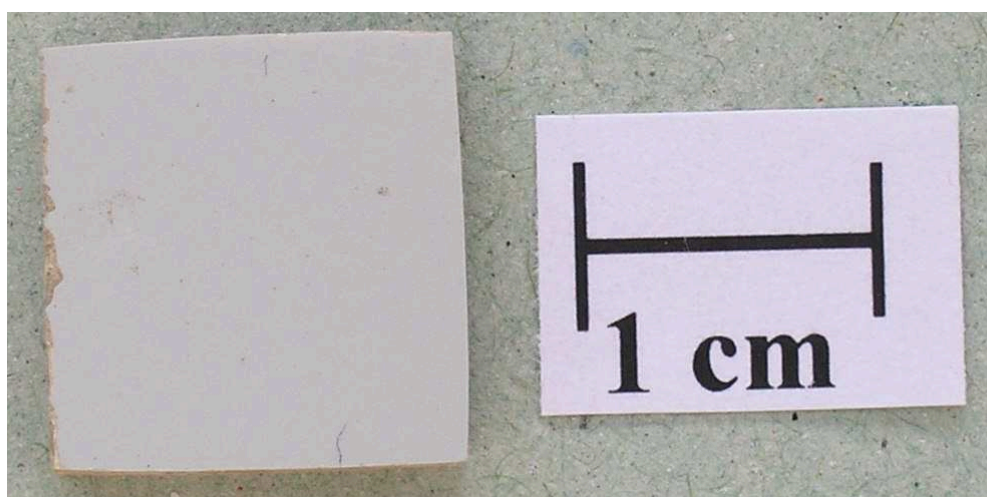


Obr. 3.5. Vzorek č. 2

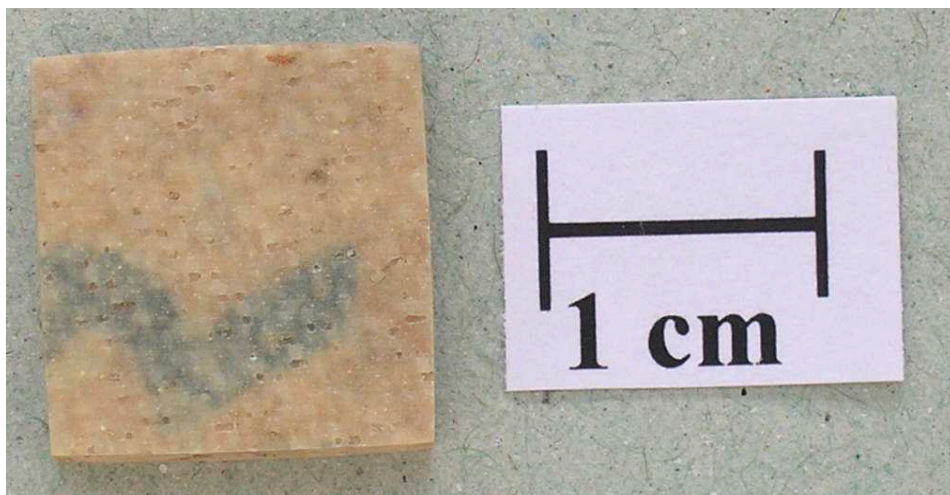
- Kompozitní sendvičová struktura (vzorek č. 3). Znázorněna na obr. 3.6. až 3.8.



Obr. 3.6. Vzorek č. 3

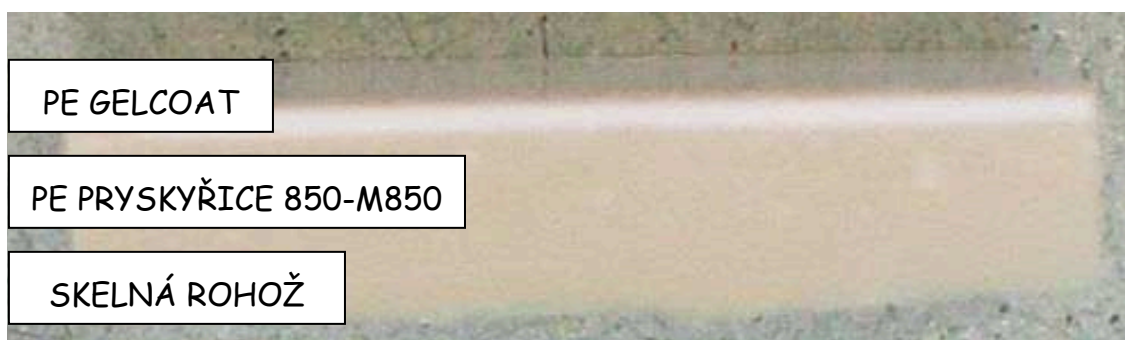


Obr. 3.7. Vzorek č. 3

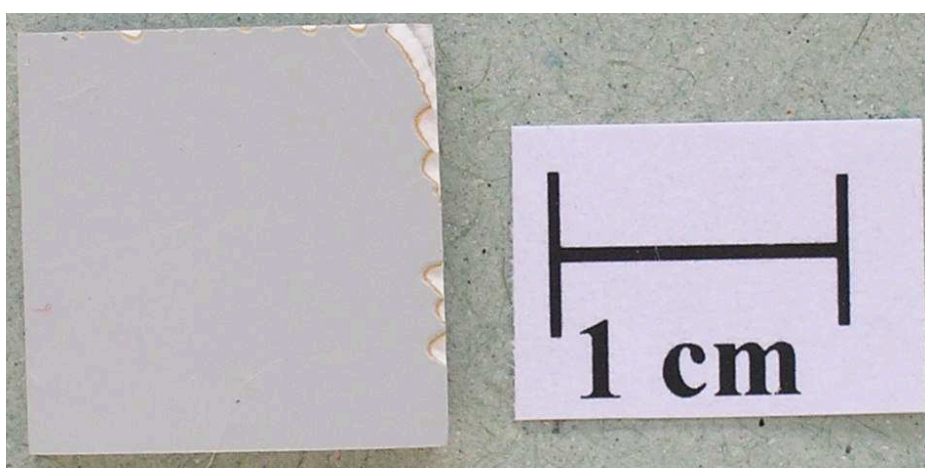


Obr. 3.8. Vzorek č. 3

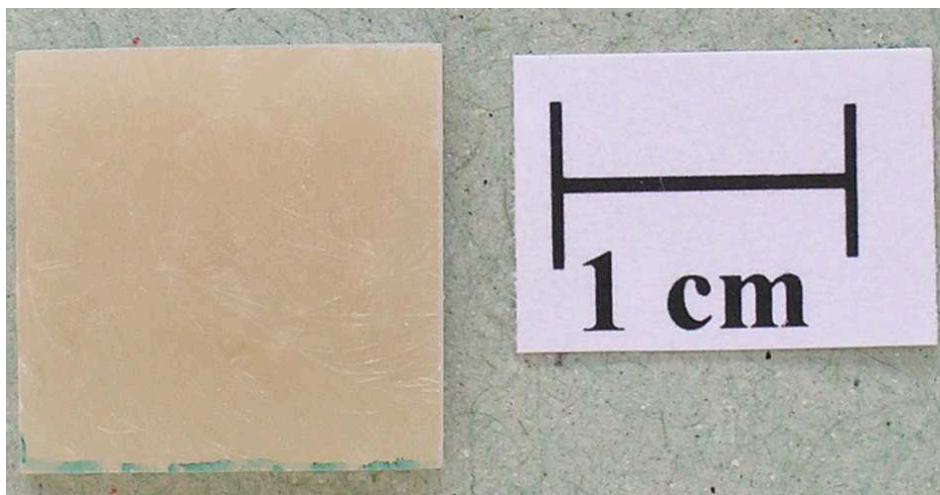
- Kompozit (vzorek č. 4). Ukázka struktury je na obr. 3.9. až 3.11.



Obr. 3.9. Vzorek č. 4

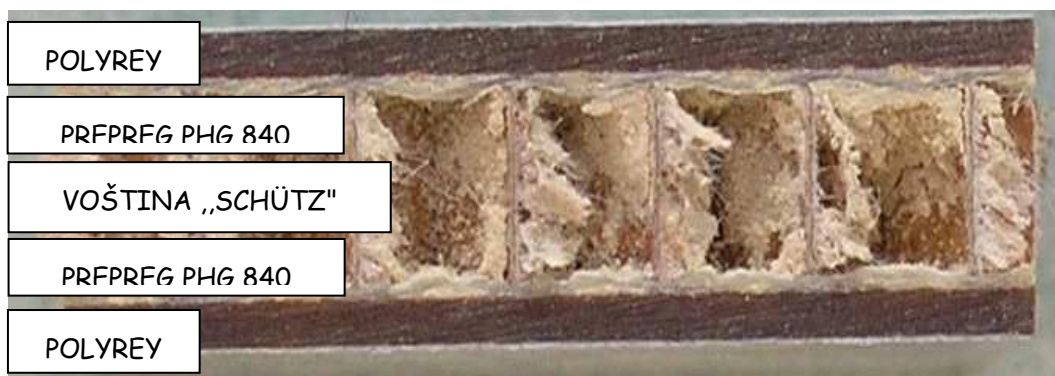


Obr. 3.10. Vzorek č. 4

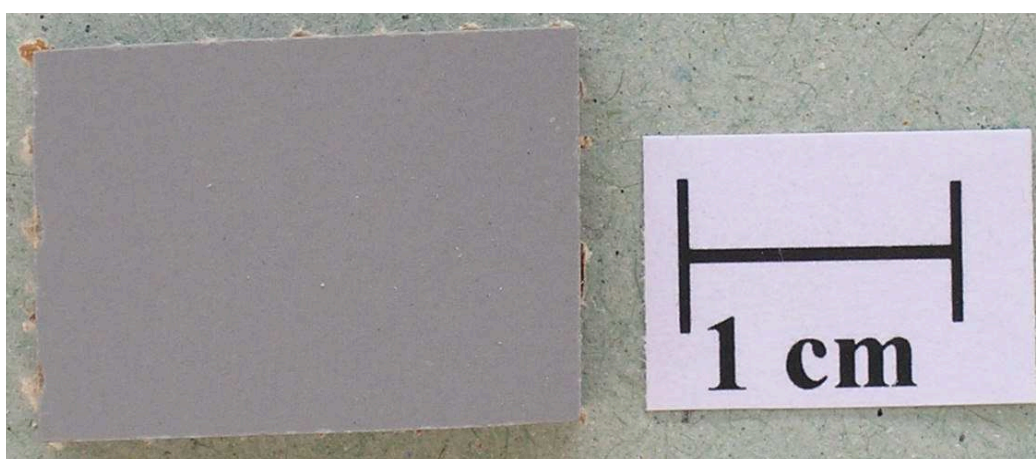


Obr. 3.11. Vzorek č. 4

- Sendvičová struktura (vzorek č. 5). Detailní snímek struktury na obr. 3.12.a 3.13.



Obr. 3.12. Vzorek č. 5



Obr. 3.13. Vzorek č. 5

3.2 Popis vlastností použitých sendvičových struktur

V této části uvádíme informace o složení sendvičových struktur, tak jako jsou uvedeny v materiálových listech firmy FORM s. r. o.

✓ Epoxidový prepreg M34

HexPly® M34 je epoxidový systém, speciálně vyvinutý pro nízké teploty vytvrzování velkých konstrukčních prvků, a to zejména v průmyslových trzích. *HexPly® M34* je samozhášecí systém, poskytující vynikající ohnivzdorné vlastnosti. *M34* prepreg je ideální pro výrobu sendvičových konstrukcí, poskytuje vynikající přilnavost k *PVC* pěnovým jádrům. Vykazuje dobrou skladovatelnost při pokojové teplotě. Vlastnosti vytvrzené matrice jsou uvedeny v tab. 3.1.:

Výhody a funkce:

- bezhalogenový
- 10 dní skladovatelnosti při pokojové teplotě
- samolepicí na *PVC*
- schopnost nízkotlakého lití 0,8-3 bar
- dobrá ohebnost a manipulovatelnost
- vhodné pro tlusté lamináty - nízká exotermická reakce

Tab. 3.1. Vlastnosti vytvrzené matrice vytvrzené při 75 °C/8hodin [10]

Test	Hodnoty	Metoda
Teplota skelného přechodu	80°C	DMA
Hustota po vytvrzení pryskyřice	1,26 g/cm ³	
Pevnost	Str = 120 MPa	
	Mod = 3,8 GPa	

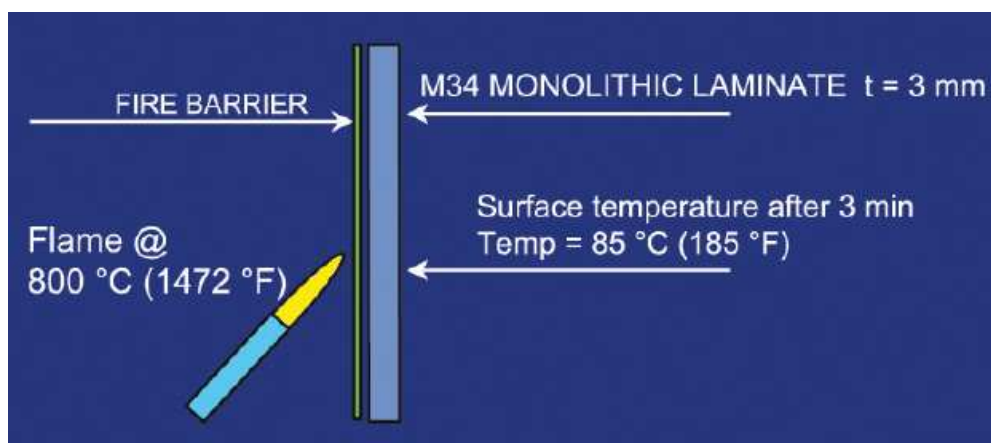
Vulkanizační podmínky prepregu:

Standardní délka cyklu je 8 hodin při 75 °C, při tlaku mezi 80 000 až 300 000 Pa. Mohou být ale použity i následující alternativní cykly (tab. 3.2.):

Tab. 3.2. Alternativní cykly vulkanizace [10]

Teplota	Čas
65°C	16 hodin
90°C	90 minut
120°C	40 minut

U sendvičových konstrukcí, společnost *Hexcel Kompozity*, vyvinula požární bariérový materiál, který je impregnovaný s *HexPly® M34* pryskyřicovým systémem. Tento bobtnající materiál expanduje při kontaktu s plamenem, vytváří spálenou vrstvu obsahující zachycený vzduch, který chrání podklad před účinky požáru (obr. 3.14.).



Obr. 3.14. Požární bariérová schopnost M34 [10]

✓ PET pěna AIREX T90 (5 mm)

AIREX® T90 je *PET* pěna s uzavřenými póry, je termoplastická, recyklovatelná a vyznačuje se vynikajícími mechanickými a *PKT* (plamen, kouř, toxicita; v angličtině *FST*) vlastnostmi. *T90* je určena pro použití se všemi pryskyřičnými systémy a technologiemi zpracování. Snadno se používá, je tvarovatelná za tepla. Mimoto je chemicky stabilní a odolná vůči *UV* záření a neabsorbuje vodu. Je teplotně stabilní při vysoké teplotě zpracování, aniž by došlo k rozpínání nebo k zplynování.

Aplikace:

- lodě (paluby, interiéry, nástavby)

- silniční a železniční (podlahy, bočnice, interiéry, střechy, kryty motoru)
- průmyslové (kontejnery, rentgenové stoly, sportovní potřeby)
- architektura a stavebnictví (střechy, obklady, kopule, přenosné stavby)

✓ Fenolický prepreg PHG840

PH840-300-42 je bezhalogenový modifikovaný fenolový systém, navržený pro lamináty s jasnou barvou a dobrou kvalitou povrchu. Tento prepreg byl vyvinut pro průmyslové a železniční aplikace. S vysokými specifickými mechanickými vlastnostmi a vynikající *FST* (nízká tepelná propustnost a hustota kouře) chování. Technologické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.3. a v tab. 3.4. jsou vlastnosti mechanické.

Přiskyřicová matrice *PH840* může být vytvrzena při teplotním rozmezí mezi 120°C a 160°C . Jednolitě a sendvičové struktury mohou být takto snadno vyráběny tímto prepregem. Vytvrzování se může provádět vakuem, tlakem a litím v autoklávu s tlakem nejméně $0,07\text{ MPa}$. Podmínky vytvrzování uvádí tab. 3.5.

Tyto kompozitní struktury mohou být snadno vystaveny teplotám v rozmezí od -55°C až do $+80^{\circ}\text{C}$.

Prepreg je vhodný pro:

- železniční průmysl
- obráběcí techniku
- námořní a automobilové aplikace

Tab. 3.3. Vlastnosti PHG840 [10]

	Test method	Value
Resin		Phenolic
Prepreg Weight	EN 2329	525 \pm 30 g/m ²
Volatile	EN 2330 (160°C/10min)	< 6.0 %
Resin Flow	EN 2332 (3 plies, 135°C, 8min, 4 bar)	> 10 %
Tackiness		T0, T1, T2
Fibre Material		E-glass
Fabric Weight	EN 2331	296 g/m ² \pm 5 %
Weave Style		8H satin
Service Temperature (Cured State)		-55°C to +80°C
Resin Content	EN 2331	42.0 \pm 3%

Tab. 3.4. Mechanické vlastnosti (typické hodnoty)

	Temp. [°C]	Standard	Results	
Flexural Strength (warp)	RT 80	ISO 178	450 300	MPa
Flexural Modulus (warp)	RT 80	ISO 178	22 19	GPa
Tensile Strength (warp)	RT 80	ISO 527-4		MPa
Tensile Modulus (warp)	RT	ISO 527-4		GPa
Compressive Strength (warp)	RT 80	EN 2850	– –	MPa
Compressive Modulus (warp)	RT	EN 2850	–	GPa
Interlaminar Tensile Shear Strength (warp)	RT 80	A/TM 1.0019/1B	18 16	MPa
Climbing Drum Peel *	RT 80	EN 2243-3	110 –	N/75 mm
Bending Load (4-P.) *	RT 80	A/TM 1.0018 Fig.2	850 –	N
Tg (TMA)		TMA	> 80	°C

Tab. 3.5. Podmínky vytvrzování [10]

		Cycle
Temperature		120/130/140/160°C
Cure Time		90/60/30/10 min
Spec. Pressure		0.07- 0.4 MPa
Heat-up		2 to 5 K/min
Cool-down		2 to 5 K/min
Remove material at		< 80°C
Recommended curing process		Vacuum bag / Oven, Press, Autoclave

✓ Composit 150

ARTBOARD/RECORE 150 jsou lehké kompozitní panely vyrobené lisováním a rozšiřováním počtu skleněných vláken na vhodnou tloušťku. Unikátní proces má za následek materiál, který kombinuje několik důležitých vlastností: nízká hmotnost, rozměrová stabilita, vysoká tuhost, požární odolnost vůči kapalinám a chemikáliím. Panely velmi dobře odolávají klimatickým podmínkám.

Standardní velikost: *1220 x 2440 mm*. Standardní tloušťka: *2-30 mm*. Mohou být vyráběny v hustotě mezi *60 až 1000 kg/m³*. Mechanické vlastnosti uvádí tab. 3.6.

Standardní jakost může být optimalizována: desky lze řezat, frézovat i vrtat. Mohou být na ně nanášeny různé povrchové vrstvy, jako opláštění hliníkovými kryty nebo *HPL* ochrana. Mohou být dodávány jako ploché desky nebo výlisky.

Fenolové desky byly úspěšně použity v železničních kolejových vozidlech a u lodí od osmdesátých let minulého století.

Tab. 3.6. Mechanické vlastnosti Composit 150 [10]

MECHANICAL PROPERTIES			
Density	200 kg/m ³	160 kg/m ³	Test method
Ultimate tensile strenght			
at +23°C	10-15 MPa	5-7 MPa	(ISO R-527)
at +50°C	10-15 MPa	5-7 MPa	
Ultimate elongation			
at +23°C	max 5%		(ISO R-527)
at +50°C	max 5%		
Flesural modulus			
at +23°C	500-600 MPa	400 MPa	(ISO R-178)
at +50°C	500-600 MPa		
at +100°C	400-500 MPa		
Elastic modulus at tensile	600-700 MPa	300 MPa	(ISO R-527)
Elastic modulus at pressure			
at +23°C	60-70 MPa		(ISO R-178)
Compressive strenght			
10 % depression	4 MPa	0.85 MPa	(DIN 51910)
20 % depression	5 MPa	1.05 MPa	
40 % depression	7 MPa	1.69 MPa	
Impact resistance	4 kJ/m ²		(DIN 53.453)

✓ NL10

CoreCork® NL10 je kompatibilní se stávajícími sendvičovými klíčovými aplikacemi, které nabízejí vynikající vlastnosti *OKT* (oheň, kouř, toxicita) s dobrými mechanickými charakteristikami. Nízká hustota *CoreCork®* materiálů, jejich pružnost a vynikající přizpůsobivost je činí snadno integrovatelnými do rychlých výrobních cyklů. *CoreCork®* lze zpracovávat ručním vrstvením, vakuovým nabalováním a infuzními procesy. Vydrží provozní teploty až do 150°C. Tab. 3.7. ukazuje mechanické vlastnosti samotného NL10 a tab. 3.8. mchanické vlastnosti NL10 v sendvičových strukturách.

Jedinečné vlastnosti *CoreCork®* jako jsou: konstrukce uzavřených vzduchových buněk, nízká nasákavost, odolnost vůči plísním, vynikající požární odolnost a vysokou mírou útlumu tónů a vibrací činí tento materiál jako vynikající alternativu k průmyslovým kompozitům.

Tab. 3.7. Mechanické vlastnosti NL10 [10]

Property	Method	Unit	NL 10
Density	ASTM C271	Kg/m ³ lb/ft ³	120 7.5
Compressive Strength	ASTM C365	MPa psi	0.3 44
Compressive Modulus	ASTM C365	MPa psi	5.1 740
Tensile Strength	ASTM C297	MPa psi	0.6 87
Shear Strength	ASTM C273	MPa psi	0.9 130
Shear Modulus	ASTM C273	MPa psi	5.9 856
Thermal Conductivity	ASTM E 1530	W/mK	0.042
Loss Factor (at 1KHz)	ASTM E756	—	0.022

Tab. 3.8. Mechanické vlastnosti NL10 v sendvičových strukturách [10]

Property	Method	Unit	NL 10
Flexural Strength at yield	ASTM D790	MPa	37
Flexural Modulus	ASTM D790	GPa	3.5
Shear Strength at yield	ASTM C392	MPa	0.8
Shear Modulus	ASTM C392	MPa	44
Compressive Strength at yield	ASTM C365	MPa	1.2
Compressive Modulus	ASTM C365	MPa	19
Water absorption (%)	ASTM C272	%	< 4
Panel density	—	—	0.600

✓ NOVPOD DloN 850-M850 - matrice

DloN® FR 850-M850 je isoftálová nenasycená polyesterová pryskyřice obsahující hydroxid hlinitý pro potlačení hořlavosti. Neobsahuje žádné halogeny, obsahuje urychlovač a thixotropní přísady. Je zvláště vhodný pro výrobky, kde je požadována minimální kouřivost spolu s ostatními parametry hořlavosti. Tab. 3.9. uvádí fyzikální vlastnosti a tab. 3.10. naopak vlastnosti mechanické.

DloN® FR 850-M850 obsahuje speciální přísady potlačující odpar styrenu do pracovního prostředí. Pryskyřice obsahuje parafin, který zaručuje nelepivost povrchu laminátu po vytvrzení.

Aplikace: *DloN® FR 850-M850* je vhodná pro ruční laminaci, laminaci stříkáním a další strojní aplikace.

Charakteristika:

- retardace hoření pomocí hydroxidu hlinitého
- neobsahuje halogenové prvky
- všestrannost
- výroba a kontrola kvality dle *ISO 9001*

Výhody:

- snižuje vznik dýmu při hoření
- možno použít i na místech citlivých na korozi
- vhodná pro ruční kladení a stříkání
- stabilní kvalita všech šarží

Tab. 3.9. Fyzikální vlastnosti při 23°C [10]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota	Metoda
Viskozita			
- Brookfield LVF 2/12	mPa.s(cP)	1400 – 1800	ASTM D 2196-86
- Kužel & deska	mPa.s(cP)	350 – 400	ISO 2884-1999
Obsah netěkavých látek	% hm.	69 ± 2	B070
Obsah organických rozpouštědel	kg/kg pryskyřice	31 ± 2	
Obsah celkového org. uhlíku	kg/kg pryskyřice	0,37	
Obsah netěkavých látek v obj. %	% obj.	40	
Bod vzplanutí	°C	34	ASTM D 3278-95
Geltime: 1% NORPOL PEROXIDE 1 (MEKP)	minuty	40 – 50	G020
Reaktivita při 25°C: 1% NORPOL PEROXIDE 1			DIN 16945
-25 - 35°C	minuty		
-25 – max. teplota	minuty		
Max. teplota	°C		
Skladovatelnost od data výroby	měsíců	6	-

Tab. 3.10. Mechanické vlastnosti v plně vytvrzeném stavu [10]

Vlastnosti	Jednotka	Hodnota	Hodnota (rohož)	Hodnota (rohož)	Metoda
Obsah skla	%	-	25 – 30	30 – 35	
Pevnost v tahu	MPa	55	100	120	ISO 527-1/2-1993
E-modul v tahu	MPa	6500	9200	11500	ISO 527-1/2-1993
Protažení při přetržení	%	1,2	2,4	2,3	ISO 527-1/2-1993
Pevnost v ohybu	MPa	90	160	200	ISO 178-2001
E-modul v ohybu	MPa	6200	9000	9700	ISO 178-2001
Rázová houževnatost, P4J	mJ/mm ²	7,5	80	90	ISO 179-2001

✓ **Skelná rohož - výztuž**

V rozsahu 300 g/m².

✓ **Polyesterový Gelcoat Reichhold NGA HXS - povrchová úprava**

NORPOL NGA HX3 je vrstva gelu ke zpomalení hoření na bázi isoftalové / neopentylglykolé polyesterové pryskyřice. Tab. 3.11. znázorňuje fyzikální vlastnosti a tab. 3.12. vlastnosti mechanické a fyzikální.

NORPOL NGA HX3 je schválen pro výrobu lodí v souladu s:

- Pravidly Det Norske Veritas "pro klasifikaci High Speed, Light Craft a Naval Surface Draft".
- Det Norske Veritas "Standardy pro certifikaci č. 2.20, záchranná plavidla a čluny", 2007.

Doporučené dávkování peroxidu: 1,3-2,0 %.

Doporučená tloušťka vrstvy: 0,55 - 0,85 mm (mokrý film).

Obsah kyslíku: 26-27 %.

Tab. 3.11. Fyzikální vlastnosti v kapalném stavu při 23°C [10]

Properties	Unit	Hand quality	Test method
Viscosity			
- Brookfield RVF sp.4/4 rpm	mPa.s(cP)	14000-30000	A050
- Cone & Plate	mPa.s(cP)	500-700	A010
Density	g/cm ³	1.3-1.5	B020
Flash point	°C	26	ASTM D 3278-95
Gel time: 1.5% NORPOL PEROXIDE 1	minutes	10-25	G020
Storage stability from date of production	months	6	G180

Tab. 3.12. Mechanické a fyzikální vlastnosti Gelcoat báze (PE pryskyřice) ve vytvrzeném stavu [10]

Properties	Unit	Value	Test method
Tensile strength	MPa	min. 65	ISO 527-1993
Tensile modulus	MPa	min. 3000	ISO 527-1993
Tensile elongation	%	min. 3.0	ISO 527-1993
Heat distortion temp.	°C	min. 90	ISO 75-1993
Hardness Barcol	-	min. 40	ASTM D 2583-99
Water absorption	mg/test piece	max. 65	Det norske Veritas 1981

✓ Nomexová voština Schütz – 5 mm

Vysoce výkonný lehký materiál od firmy *SCHÜTZ* pro průmyslové aplikace (obr. 3.15.).

Výhody:

- výborný poměr nákladů a přínosů
- vynikající mechanické vlastnosti s vysokou pevností k hmotnosti poměry
- vysoká tvarová stálost za tepla a vlhkosti
- vysoké funkce teploty, servisní teplota až do 180 °C
- uniformity výrobku a výjimečné pryskyřice na papíru soudržnosti

Aplikace: Hlavní strukturální sendvičové aplikace v průmyslových aplikacích (automobilový, námořní, železniční, dopravní a sportovní průmysl).



Obr. 3.15. Struktura voštiny [10]

✓ Vysokotlaký laminát Polyrey

Jednotlivé vrstvy laminátu zachycuje obr. 3.16.



Obr. 3.16. Jednotlivé vrstvy laminátu Polyrey [10]

Vlastnosti:

- všestranný, odolný a hygienický povrch
- vysoká odolnost proti vnějším vlivům (oděr, náraz, skvrny, atd.)
- *sanitized®* – povrch antibakteriálně ošetřen ionty stříbra
- neporézní, voděodolný povrch
- bezpečný při styku s potravinami (IANESCO)

Použití:

- vhodné do náročného prostředí – obchody, hotely, kanceláře, školy, nemocnice atd.
- vhodné jak na horizontální (dveře, obklady stěn), tak vertikální použití (pracovní desky, nábytek)
- vhodné k lepení na jakýkoliv nosič (dřevo, kov, kámen, voština atd.)
- ohýbání za studena i za tepla (postforming)
- 82 dekorů dostupných ve dveřních formátech 215x97 a 245x124 cm
- certifikováno *MED* pro použití v lodním průmyslu

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Teoretické východiska k měření tepelných parametrů pevných látek pomocí modelu soustředěné tepelné kapacity

Tepelné a mechanické vlastnosti pevných látek hrají důležitou roli v procesu optimalizace materiálů. A to zejména v případě kompozitů, betonu, polymerů, ocelí, skel a keramiky. Stanovení základních tepelných hodnot, jako je tepelná vodivost k , teplotní vodivost α a měrná tepelná kapacita c_p pokrývají široké spektrum experimentálních metod založených na přímých nebo nepřímých měřeních [11].

Budeme vycházet z diferenciální rovnice:

$$m \cdot c_p \frac{dT}{dt} = -h \cdot S \cdot (T - T_\infty) \quad (4.1.)$$

Přičemž platí:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot S \cdot L, \quad (4.2.)$$

kde ρ je hustota vzorku, L je tloušťka vzorku a S je efektivní chladnoucí plocha. V našem případě se vzorek ochladí na obou stranách, a tak se může psát:

$$S = S_{top} + S_{lower} = 2S. \quad (4.3.)$$

Po integraci se následně získá vztah:

$$\int_0^t \frac{\rho S L c_p dT}{(T - T_\infty)} = -2h \cdot S \cdot \int_0^t dt \quad (4.4.)$$

$$T = [\rho S L c_p \ln(T - T_\infty)]_0^t = [-2h S t]_0^t. \quad (4.5.)$$

Pokud jsme si stanovili:

$$\tau = \frac{\rho \cdot c_p \cdot L}{2 \cdot h_t}, \quad (4.6.)$$

kde h_t je celkový součinitel prostupu tepla,

pak:

$$[(T - T_{\infty})]_0^t = [e^{-t/\tau}]_0^t. \quad (4.7.)$$

Finální vztah pro časovou závislost teploty má potom tvar:

$$T = [(T - T_{\infty})]_0^t \cdot \exp(-t / \tau) + T_{\infty}. \quad (4.8.)$$

Vztah mezi k , c_p a α má tvar:

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot c_p, \quad (4.9.)$$

kde k je tepelná vodivost vzorku, α je vodivost, c_p je měrná tepelná kapacita a ρ je hustota vzorku.

Platnost modelu je ověřena pomocí Biotova čísla (Bi) ve formě:

$$Bi = \frac{h_t L}{2k} \ll 1. \quad (4.10.)$$

Kde:

$$h_t = h_c + h_r \quad (4.11.)$$

představuje tzv. kombinovaný součinitel přestupu tepla konvekcí se součinitelem h_c a záření s koeficientem h_r [12].

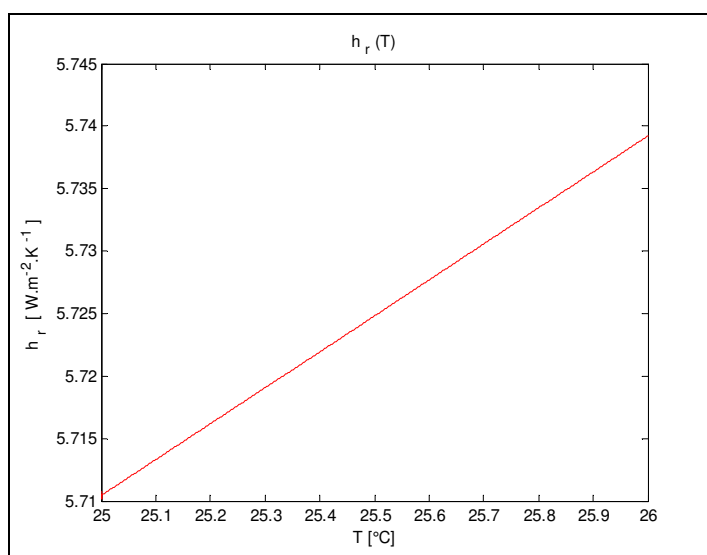
V případech, kdy je teplotní rozdíl mezi chladnoucím tělesem a jeho okolím velmi malý, kombinovaný koeficient prostupu tepla h lze považovat za konstantu, která není závislá na teplotě, respektive na čase. Integrace rovnice (4.4.) poté, při počáteční podmínce (4.10.), dává jednoznačné analytické řešení ve tvaru teplotní funkce (4.8.), avšak s relaxačním časem:

$$\tau = \frac{\rho c_p L}{h_t}. \quad (4.12.)$$

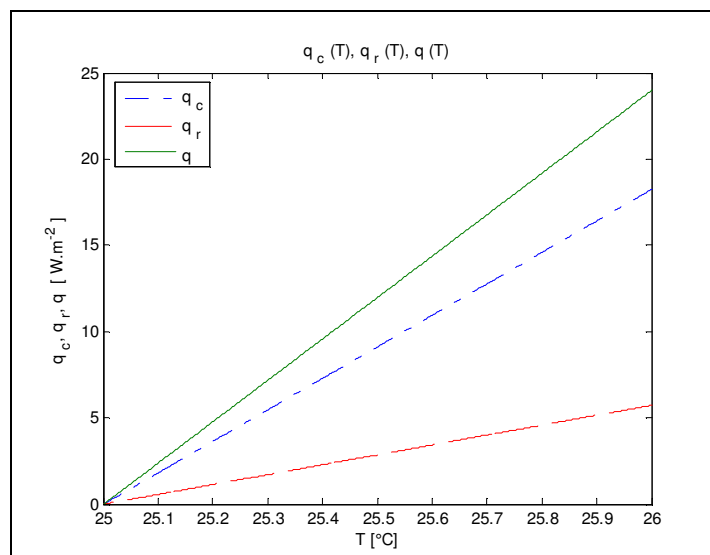
Na obrázku 4.1. je uvedena simulovaná teplotní závislost koeficientu radiačního prostupu tepla přes povrch planparalerní desky s konstantním koeficientem emisivity $\varepsilon = 0,95$, která chladne při konstantní teplotě okolního vzduchu $T_{\infty} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, s maximálním teplotním rozdílem $\theta_{max} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a koeficientem konvektivního prostupu tepla $h_c = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Analýza výsledků simulace ukázala, že koeficient radiačního prostupu tepla je na sledovaném teplotním intervalu 25-26 $^{\circ}\text{C}$ prakticky lineární funkcí teploty s rostoucím trendem. Hodnota koeficientu h_r se přitom na sledovaném teplotním intervalu nezmění více než o 0,5 %, proto ji - s ohledem na přibližně 5 % - ní přesnost modelu - lze aproximovat

její aritmetickým průměrem nebo mediánem, který je méně citlivý vůči vybočujícím i extrémním hodnotám [13].

Prakticky už i při pokojových teplotách a poměrně velmi malých teplotních rozdílech mezi chladnoucím tělesem a jeho okolím je hodnota hustoty radiačního tepelného toku (obr. 4.2. - přerušovaná čára) oproti hustotě tepelného toku konvektivního prostupu tepla (obr. 4.2. - přerušovaná čára s tečkami) nezanedbatelně velká. Radiační tepelný tok má v daném případě v průměru až více než 23,88 % - ní podíl na celkovém odvodu tepla z povrchu tělesa. Při popisu procesu ochlazování je proto obvykle nezbytné brát v úvahu jako konvektivní, tak i radiační mechanismus přenosu tepla a počítat s kombinovaným charakterem tepelných interakcí tělesa s okolím, což mnohem přesnější odpovídá makroskopicky popisu procesů tepelné výměny jako je to při aplikaci jednoduchého exponenciálního modelu prvního řádu, který radiaci zanedbává [14].



Obr. 4.1. Teplotní závislost koeficientu radiačního prostupu tepla [15]



Obr. 4.2. Grafická závislost hodnoty hustoty radiačního tepelného toku [15]

S narůstajícími teplotními rozdíly mezi chladnoucím tělesem a jeho okolím se možnost sblížení koeficientu radiačního prostupu tepla konstantní hodnotou již definitivně ztrácí. Při vyšších teplotách a teplotních rozdílech se začíná projevovat i teplotní závislost koeficientu konvektivního prostupu tepla. Výrazněji se tedy projevuje také teplotní závislost úhrnného koeficientu prostupu tepla, který častokrát bývá poměrně komplikovanou funkcí řady faktorů. Tyto přitom závisí na konkrétní situaci, například od drsnosti a emisivity povrchu chladnoucího tělesa, typu proudění v okolním prostředí, jeho fyzikálních vlastností, podmínek na hranici tělesa s tekutinou a v tekutině samotné a podobně.

Při vyšších teplotách se může projevit i teplotní závislost ostatních fyzikálních parametrů soustředěných v relaxačním čase, který takto ztrácí charakter konstantní veličiny [15].

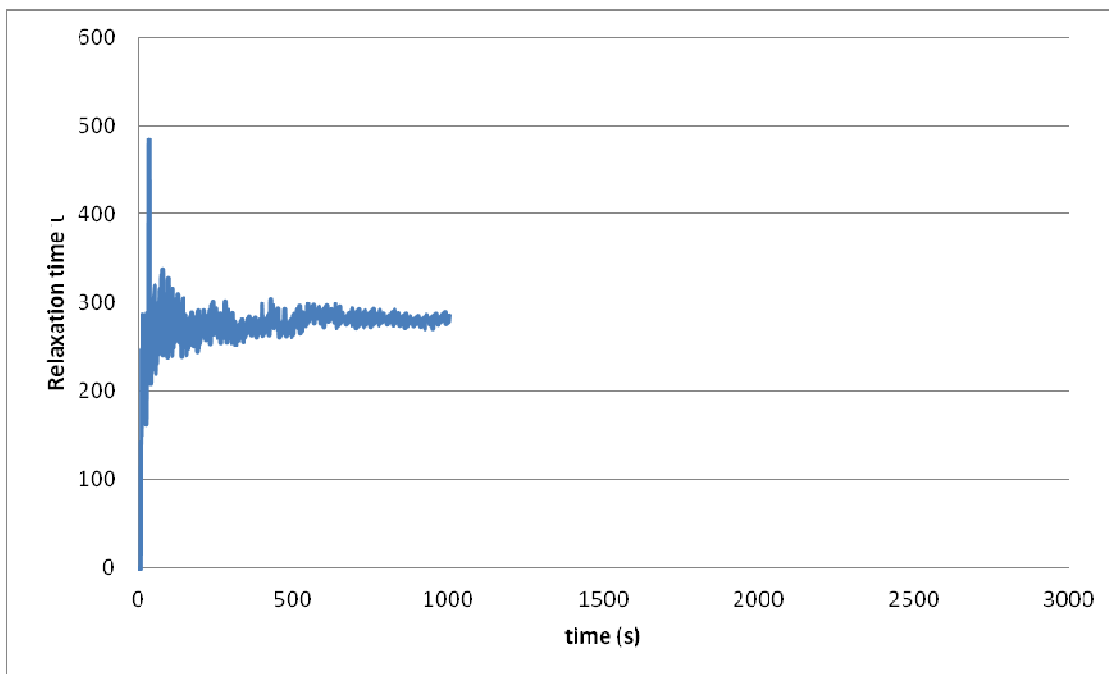
V procesu chlazení vzorku není konstantní relaxační doba v celém rozsahu měření. Chceme-li vyhodnotit tento proces, musíme zvolit správný interval, kde je τ přibližně konstantní. Z rovnice (4.8.) můžeme získat vztah:

$$\tau = -t/\ln\varphi, \quad (4.13.)$$

kde:

$$\varphi = [(T - T_\infty) - (T(0s) - T_\infty)]. \quad (4.14.)$$

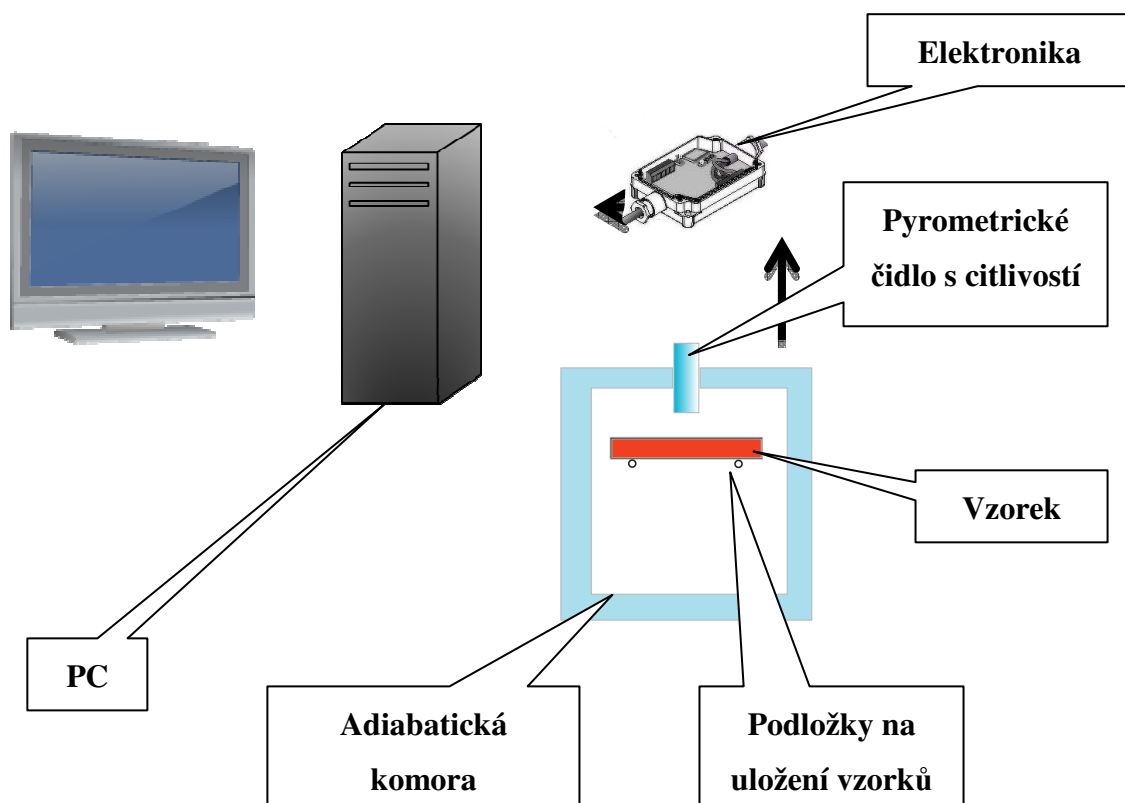
Vztah (4.14.) umožňuje nastavit správný, téměř konstantní interval z jeho časové závislosti. Charakteristická časová závislost relaxačního času na času pro měděný vzorek je na obrázku 4.3.



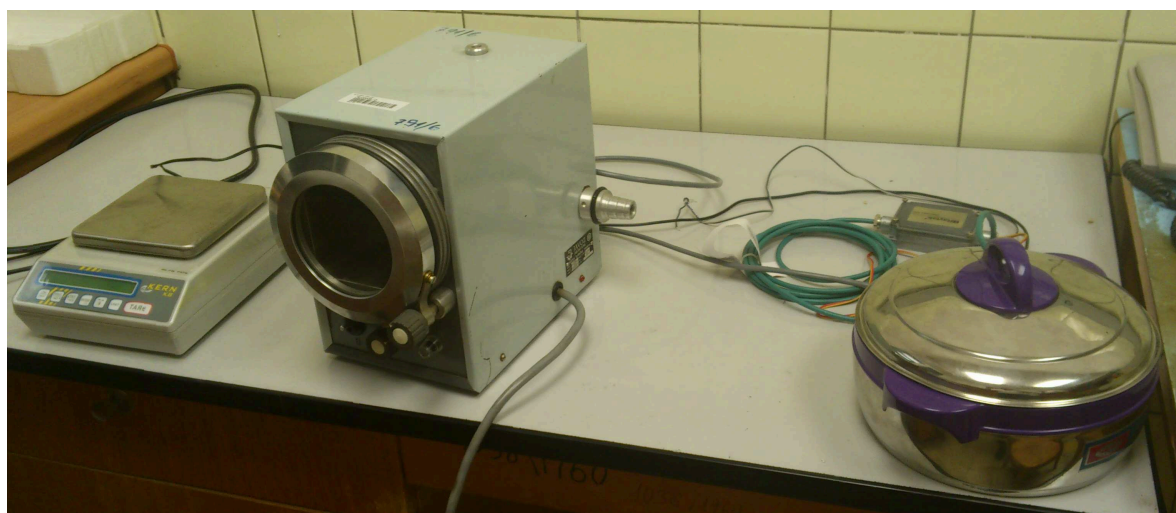
Obr. 4.3. Relaxační doba vzorku Cu [15]

4.2 Popis konstrukce aparatury na měření tepelných parametrů pevných látek

V této kapitole budou zobrazeny detaily měřicí aparatury. Obr. 4.4. ukazuje schéma aparatury, obr. 4.5. reálný pohled na aparaturu a obr. 4.6. detailní záběr na měřicí čidlo. Na obr. 4.7. je pohled seshora na konstrukci měřicí aparatury a na obr. 4.8. elektronika senzoru.



Obr. 4.4. Schéma aparatury [15]



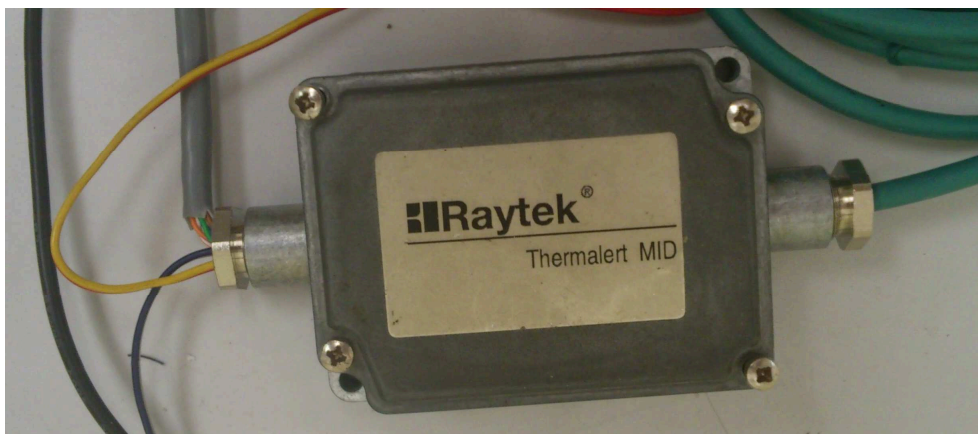
Obr. 4.5. Měřicí aparatura, pec, váhy



Obr. 4.6. Pyrometrické čidlo



Obr. 4.7. Konstrukční řešení aparatury



Obr. 4.8. Elektronika senzoru

Příprava vzorků

Vzorky musí být:

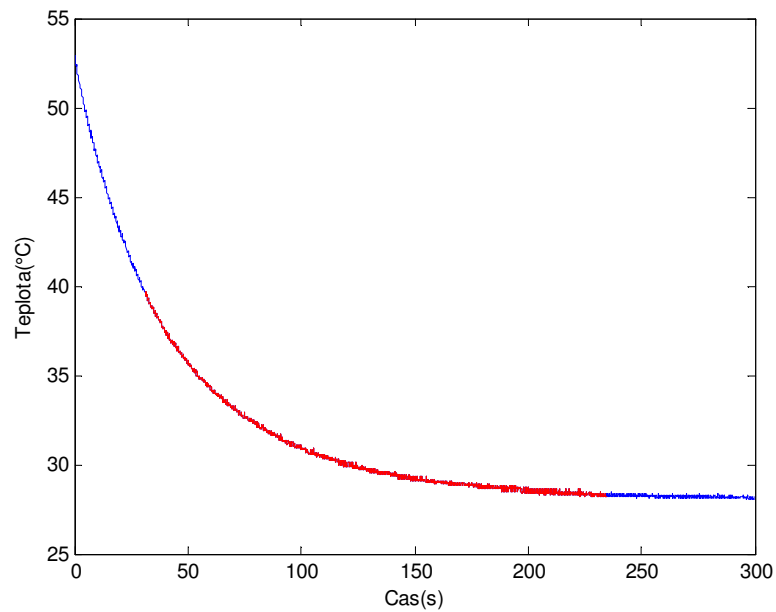
- a) jemně obroušené, případně leštěné,
- b) tloušťka vzorku musí být co nejnižší s ohledem na tepelnou vodivost materiálu (čím nižší vodivost, tím menší tloušťka),
- c) povrch vzorků musí být nastříkán matným černým lakem (emisivita).

Postup při měření

- a) Vzorek se zahřeje v termostatu nad teplotu okolí.
- b) Poté se vzorek vloží do adiabatické komory, která se následně uzavře.
- c) Pomocí PC se spustí automatické stahování časových změn teploty vzorky, které se předem nastaví na *5-10 minut*.
- d) Poté nastupuje zpracování dat [16].

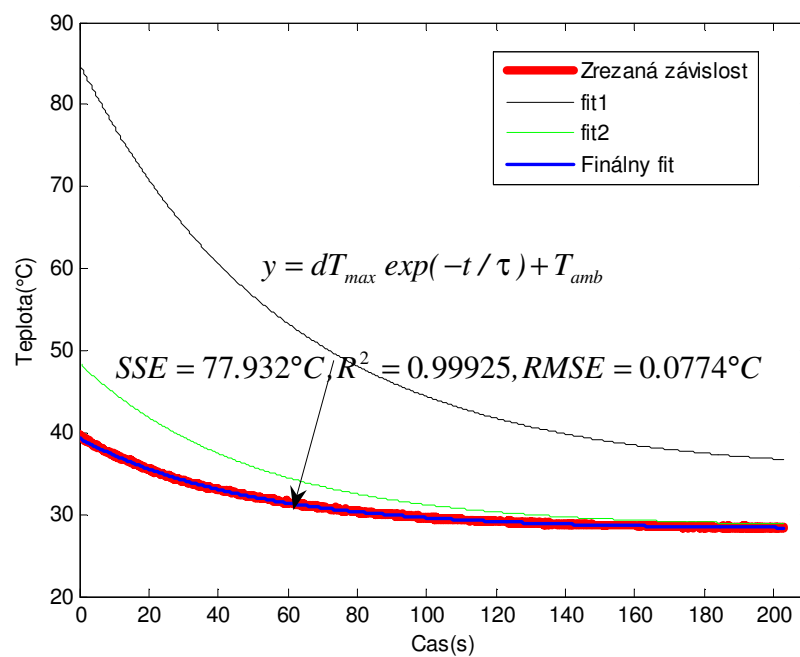
Zpracování křivek chladnutí probíhá v následujících krocích:

Vytvoření proměnných času t a teploty T z naměřených dat (textový soubor o 2 sloupcích čas - teplota) - modrá křivka. Seřiznutí závislosti teplota - čas - červená křivka (obr. 4.9.).

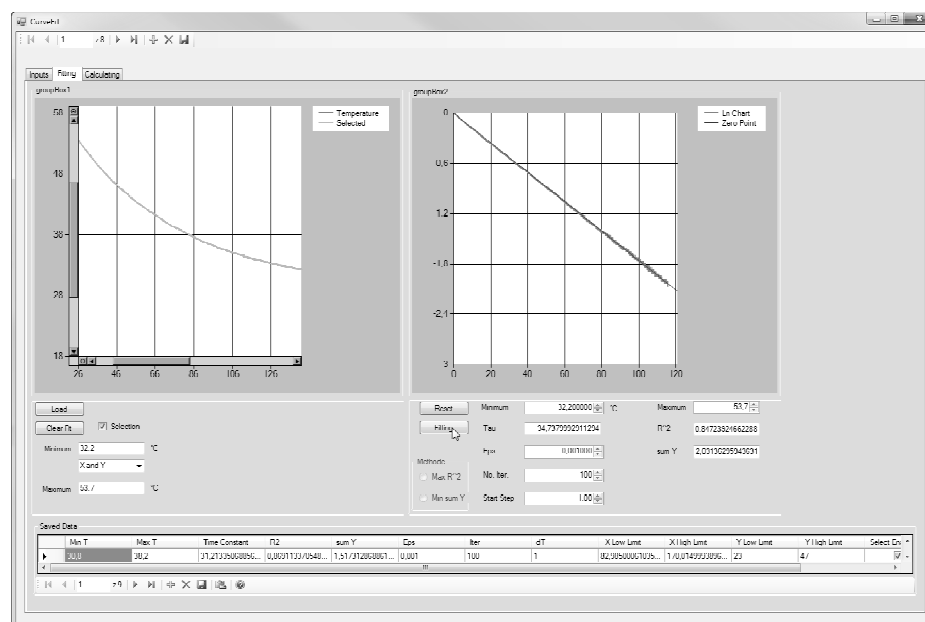


Obr. 4.9. Závislost poklesu teploty vzorku na čase [16]

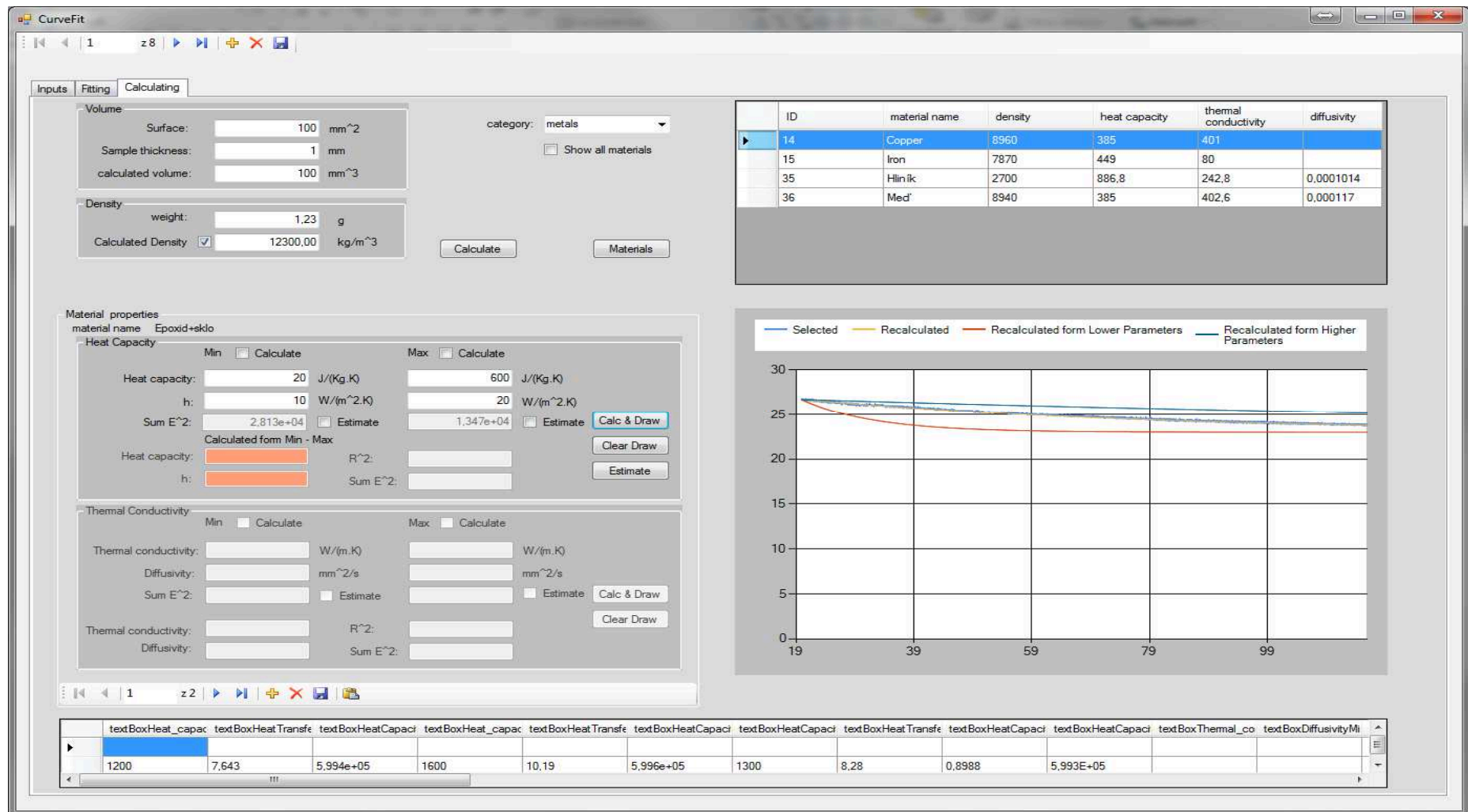
Linearizací exponenciály se určí τ z rovnice č. 4.6. Fitting procedura je schématicky zobrazená na obr. 4.10., schéma fitting procedury pro h , c_p , k a α je na obrázku 4.11. a výsledek je zobrazen na kopii obrazovky na obrázku 4.12. Obr. 4.13. zobrazuje detailní pohled na vizualizaci procesu fitting.



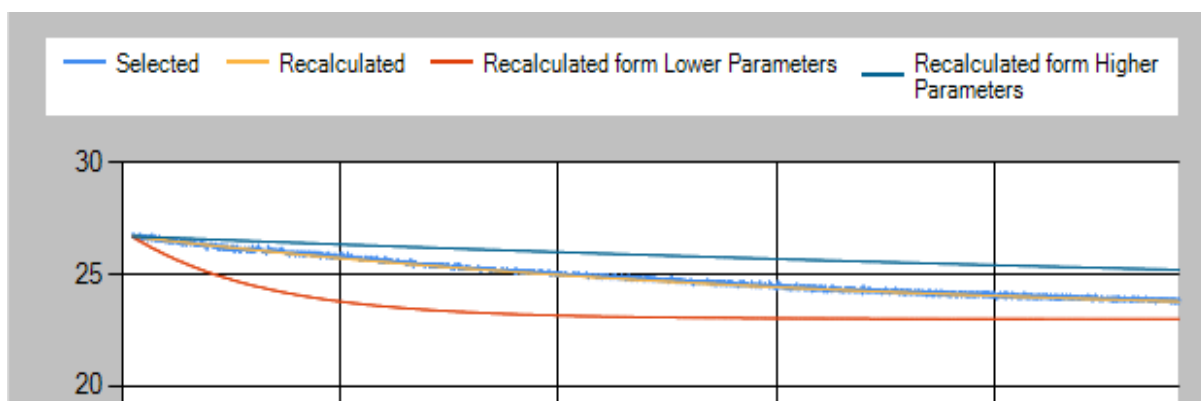
Obr. 4.10. Schéma fitting procedury [16]



Obr. 4.11. Kopie obrazovky [16]



Obr. 4.12. Vizualizace procesu fitting [16]



Obr. 4.13. Detailní vizualizace procesu fitting [16]

4.3 Určování c_p a h

Relaxační čas lze vyjádřit vztahem:

$$\tau = (\rho c_p L) / (2h) \quad (4.15.)$$

- hledáme c_p a h_t
- $h_t \approx (15-25)$ z experimentu
- Δc_p interval se učí podle typu materiálu podle tab. 4.1.
- iterací se určí hodnota c_p a h [16]

V následující tabulce 4.1. jsou uvedeny odhadované intervaly hodnot měřených vlastností.

Tab. 4.1. Odhady tepelných parametrů pro různé materiály [17]

Materiál	Koef. Přest. Tepla Interval (W/m ² .K)	Tepelná kapacita Interval (J/kg.K)	Teplotná vodivost Interval (m ² /s)	Tepelná vodivost Interval (W/m.K)
HDPE	20-30	1800-2700	(1,76-3,07).10 ⁻⁷	0,46-0,52
Hliník	30-40	866,7-908,7	(0,997-1,02) .10 ⁻⁴	238,7-244,6
Měď	20-30	315-470	(1-1,35) .10 ⁻⁴	380-420
Epoxid+sklo	20-30	1000-1500	(1-10).10 ⁻⁷	0,1-2
Epoxid+Uhlík	20-30	500-2000	(2-10).10 ⁻⁷	0,1-3

PC	30-40	1000-1200	$(1,2-1,5).10^{-7}$	0,19-0,22
ABS	30-40	1000-1200	$(1-1,25).10^{-7}$	0,165-0,175
PMMA	20-30	1300-1500	$(0,9-1,1).10^{-7}$	0,18-0,20
Elastomery	x	1200-1600	$(1-3).10^{-7}$	0,1-0,3

4.4 Určování k a α

Tepelnou vodivost můžeme vyjádřit vztahem:

$$k = \alpha \rho c_p \quad (4.16.)$$

Hledáme k a α , přičemž už známe c_p . Δk a $\Delta \alpha$ interval se učí podle typu materiálu z tabulky 4.1. ... Iterací se určí hodnota k a α [16].

4.5 Výhody a nevýhody aparatury

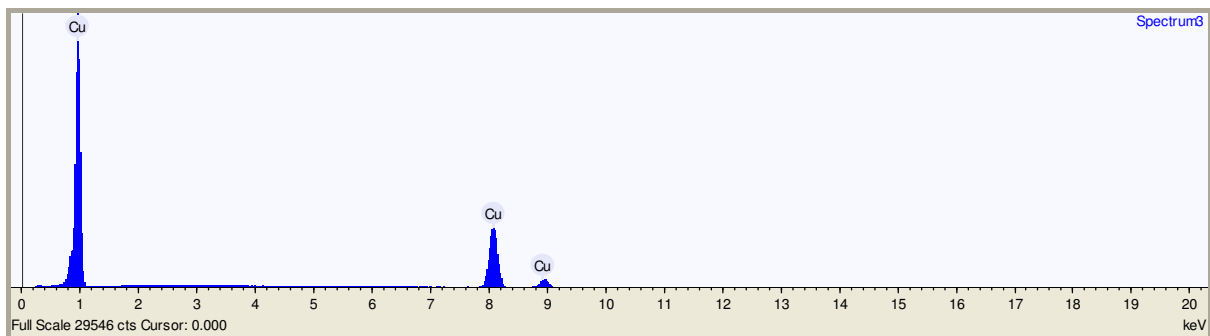
Výhody:

- Relativně vysoká přesnost měření.
- Široké rozpětí tepelných vlastností materiálů.
- Krátký čas měření cca 10 min. - plně automatizovaný experiment.
- Možnost měření malých vzorků ($S = 1 \text{ cm}^2$, $L = 1-2 \text{ mm}$).

Nevýhody:

- Aparatura neumožňuje měřit teplotní závislosti tepelných parametrů [16].

4.6 Prověření aparatury



Obr. 4.14. EDAX analýza vzorku Cu [16]

Abychom prověřili správnou činnost aparatury, změřili jsme vzorek technické mědi, jejíž *EDAX* analýza je na obr. 4.14.

Ten stejný vzorek byl měřeni *Netzsch laser equipment LFA 427*. Rozdíl v naměřených hodnotách difuzivity byl 8,4 %, což je výborná shoda.

Ze získaných výsledků vidět, že přesnost měření (P_{99}) jako i jejich reprodukovatelnost (10 měření každého vzorku) je velmi dobrá a pohybuje se pod hranicí 10 %. Rozdíl mezi tabulkovou a naměřenou střední hodnotou je 9,15 %, což je způsobeno zřejmě nižší čistotou použité mědi. Výsledky pro měď v tab. 4.2. jsou uvedeny i se statistickými chybami následovně:

Tab. 4.2. Získané výsledky pro Cu

	Cu_{tab.}	Cu_{ref.}
c_p [J.kg⁻¹.K⁻¹] P₉₉	383	418,08 ± 3,95 (405,25-430,91)
α [m².s⁻¹] P₉₉	1,17.10 ⁻⁴	1,04.10 ⁻⁴ ± 4,70.10 ⁻⁷ (1,02-1,05) .10 ⁻⁴
k [W.m⁻¹.K⁻¹] P₉₉	402,6	379,93 ± 1,98 (373,48-386,38)
Bi	<0,1	7,80.10 ⁻⁵

5 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT

Výsledkem měření je často hodnota získaná výpočtem z výsledků vícero opakovaných měření. Vzhledem k tomu, že skutečnou hodnotu měřené veličiny zjišťujeme procesem měření, který je zatížený různými chybami, výsledek měření je jen odhadem

(skutečné) hodnoty měřené veličiny. Při udávání výsledku měření je proto důležité stanovit i kvalitu tohoto odhadu, která se definuje pomocí nejistoty.

5.1 Typy nejistot

Někdy se nejistoty získané metodou *A* stručně označují jako nejistoty typu *A*, podobně nejistoty získané metodou *B* jako nejistoty typu *B*. Z těchto základních typů nejistot se potom lehko pomocí součtu jejich čtverců určí výsledná kombinovaná nejistota u_C .

Všeobecně potom můžeme pro nejistotu u_f odhadu f napsat vztah:

$$u_f = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_i^2 u_{x_i}^2}, \quad (5.1.)$$

kde u_{x_i} jsou jednotlivé složky nejistot, A_i je koeficient citlivosti (převodu) příslušného zdroje nejistoty, který známe anebo se určí jako parciální derivace funkce f podle příslušné vstupní veličiny x_i :

$$A_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial F(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)}{\partial x_i}. \quad (5.2.)$$

5.2 Vyhodnocení standardních nejistot vstupní veličiny metodou typu A

Metoda vyhodnocení tohoto typu nejistot je založena na statistické analýze opakované série měření. Když máme n nezávislých stejně přesných pozorování ($n > 1$), bude odhad výsledné hodnoty f reprezentovaný hodnotou výběrového průměru (aritmetického průměru) \bar{f}_i . Tento typ nejistoty se označí jako u_{Af} a můžeme ji vyjádřit ve tvaru:

$$u_{Af} = s(\bar{f}_i) = \frac{s(f_i)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (f_{i,k} - \bar{f}_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (5.3.)$$

Tato nejistota je způsobena kolísáním naměřených údajů. Když máme k dispozici malý počet měření ($n < 10$), je hodnota určená podle tohoto vztahu nespolehlivá a měli bychom tuto nejistotu (způsobenou kolísáním naměřených údajů) odhadnout metodou typu *B* na základě jiných informací, jako jsou současné naměřené údaje [18].

5.3 Vyhodnocení standardních nejistot vstupní veličiny metodou typu B

Standardní nejistota typu B se odhaduje pomocí racionálního úsudku na základě všech možných a dostupných informací. Nejčastěji se používají:

- údaje výrobců měřicího přístroje,
- zkušenosti s předcházející sérií měření,
- zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů a techniky a poznatky o nich,
- údaje získané z kalibrací a z certifikátů,
- nejistoty referenčních údajů v příručkách.

Když známe maximální odchylku j -tého zdroje nejistoty $z_{j\max}$, nejistota u_{Bz_j} se určí podle vztahu:

$$u_{Bz_j} = \frac{z_{j\max}}{k}, \quad (5.4.)$$

kde k je součinitel získaný ze zákona rozdělení pravděpodobnosti, kterým se řídí zdroj nejistoty (např. pro normální rozdělení je $k = 2$, případně 3, pro rovnoměrné rozdělení $k = \sqrt{3}$, pro trojúhelníkové rozdělení $k = \sqrt{6}$ atd.)

5.4 Kombinovaná a rozšířená nejistota

Výsledná kombinovaná nejistota veličiny f se označuje u_{cf} a je vlastně odhadem směrodatné odchylky spojené s výsledkem, který je roven druhé odmocnině kombinovaného rozptylu získaného ze všech rozptylů vstupních veličin; druhé odmocnině ze součtu čtverců obou typů nejistot A i B dle vztahu:

$$u_{cf} = \sqrt{u_{Af}^2 + u_{Bf}^2} \quad (5.5.)$$

a ze všech případných kovariancí.

Pro veličiny nekorelované (vzájemně nezávislé) je kombinovaná standardní nejistota u_{cf} stanovena jako kladná druhá odmocnina z kombinovaného rozptylu u_{cf}^2 , který se určí pomocí vztahu:

$$u_{cf}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (5.6.)$$

kde F je funkce vyjadřující závislost výstupní veličiny f na vstupních veličinách x_i .

5.5 Interval spolehlivosti

Interval spolehlivosti, v němž bude ležet hodnota měřené veličiny (určovaná z n měření) se zvolenou pravděpodobností P (obecně jinou než 68,3%) je:

$$\langle \bar{x} - ts, \bar{x} + ts \rangle, \quad (5.7.)$$

kde $t = t(P, n)$ je tzv. Studentův součinitel, který modifikuje šířku intervalu spolehlivosti v závislosti na zvolené hladině pravděpodobnosti P a uskutečněném počtu n měření (tab. 5.1.). Říkáme rovněž, že spolehlivost jevu, že x_0 bude ležet v uvedeném intervalu je P anebo, že riziko jevu, že x_0 bude ležet mimo tento interval, je $\alpha = 1 - P$.

Z tabulky je zřejmé, že při námi užívaném standardním postupu ($P = 68,3\%$) a $n = 10$ se součinitel t liší od 1 jen o 6% a nemusí se tedy se běžně uvažovat. Zvolíme-li však jen 5 měření, je odchylka již 15%. Požadujeme-li riziko jen 5%, je $t > 2$ a musí se vždy uvažovat.

Stanovujeme-li krajní chybu (teoreticky pro $n \rightarrow \infty$ je $\kappa = 3\sigma$), je korekce na Studentovo rozložení velmi významná (prakticky pro běžně užívaný počet měření $n \leq 10$ je $t > 4$).

Krajní chyba jednoho měření tedy je ts , přičemž její teoretická hodnota (pro $n \rightarrow \infty$) je $3s$. Překročí-li chyba jednoho měření krajní chybu ts (pro $P = 99,73\%$), je to důvod, abychom tuto hodnotu vyloučili a provedli korigované zpracování dat měření [19].

Tab. 5.1. Studentův součinitel $t = t(P, n)$ [19]

n	$t(P, n)$			
	$P = 68,3\%$	$P = 95,0\%$	$P = 99,0\%$	$P = 99,73\%$
3	1,32	4,30	9,92	19,21
4	1,20	3,18	5,84	9,22
5	1,15	2,78	4,60	6,62
6	1,11	2,57	4,03	5,51
7	1,09	2,45	3,71	4,90
8	1,09	2,37	3,50	4,53
9	1,07	2,31	3,36	4,27
10	1,06	2,26	3,25	4,09
11	1,06	2,23	3,17	3,96
12	1,05	2,20	3,11	3,85
15	1,04	2,15	2,98	3,63
20	1,03	2,08	2,86	3,45
30	1,02	2,05	2,76	3,28
50	1,01	2,01	2,68	3,16
100	1,00	1,98	2,63	3,08
∞	1,00	1,96	2,58	3,00

5.6 Přesnost výběrového průměru – výběrová směrodatná odchylka

Sebevětší přesnost měření by byla málo cenná, pokud bychom nedovedli alespoň přibližně určit chybu výsledku. K posouzení přesnosti měření se nejčastěji užívá směrodatná odchylka. Při náhodném výběru n dat měření jsme schopni vypočítat aritmetický (tj. výběrový) průměr \bar{x} a odchylky $\Delta_k = x_k - \bar{x}$ jednotlivých naměřených hodnot x_k od tohoto průměru. Můžeme provést součet druhých mocnin těchto odchylek přes všechna k a vypočítat jejich aritmetický průměr; tedy postupovat analogicky jako v případě výpočtu směrodatné odchylky σ pro spojitou proměnnou. Součet druhých mocnin odchylek Δ_k však nemůžeme dělit počtem n měření, jak by se dalo očekávat, nýbrž $n-1$. Vyplývá to z teorie chyb a lze to přibližně vysvětlit tím, že jedno číslo z řady n je „odebráno na výpočet aritmetického průměru (teorie říká, že se tímto úkonem odebere jeden „stupeň volnosti“).

Současně je zde stejný problém jako u výpočtu aritmetického průměru – hodnocen je jen náhodný výběr souboru n měření. Proto počítanou směrodatnou odchylku budeme označovat jako výběrovou a zvolíme pro ni značku s . Takže výběrová směrodatná odchylka jednoho měření je:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \Delta_k^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}. \quad (5.8.)$$

V dalších vztazích budeme pro jednoduchost sčítací meze u symbolu \sum vynechávat. Lze dokázat, že s je nejlepším odhadem veličiny σ . Ve starší literatuře se tato veličina proto označuje přímo σ a nazývá se střední kvadratická chyba jednoho měření. Pro vyhodnocení měření je však důležitější vědět, jakou chybou bude zatížen výběrový průměr naměřených hodnot. Výběrová směrodatná odchylka aritmetického (výběrového) průměru je:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_k^2}{n(n-1)}}. \quad (5.9.)$$

Z tohoto vztahu vidíme souvislost mezi směrodatnou odchylkou aritmetického průměru a směrodatnou odchylkou jednoho měření [20].

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH ZHODNOCENÍ

Tato kapitola se bude věnovat analýze výsledků tepelných vlastností sendvičových struktur měřených v této diplomové práci. Mezi sledované veličiny patřila měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku (c_p), tepelná vodivost (k) a teplotní vodivost (α), které jsou definovány následovně:

Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku říká jaké množství tepla je třeba látce o jednotkové hmotnosti (1 kilogram) dodat, abychom ji ohřáli o 1 K . Rovnice pro výpočet znázorňuje vztah 6.1.

$$c_p = \frac{dQ}{m \cdot dT} \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (6.1.)$$

Tepelná vodivost představuje množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotku délky byl jednotkový teplotní spád (teplotní gradient, tedy podíl rozdílu teplot na koncích tyče a délky tyče). Přitom se předpokládá, že teplo se šíří pouze v jednom směru. Jinými slovy: součinitel teplotní vodivosti je výkon (tzn. teplo za jednotku času), který projde každým čtverečním metrem desky hrubé 1 m , jejíž jedna strana má teplotu o 1 K vyšší než druhá. Množství tepla Q , které projde za čas τ plochou S do hloubky d se určí ze vztahu 6.2.

$$Q = kS \frac{dT}{d} \tau \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (6.2.)$$

kde k je součinitel tepelné vodivosti a dT je rozdíl teplot ve vzdálenosti d [21].

Teplotní vodivost je veličina ukazující, jak se v látce vyrovnávají teplotní rozdíly. Neboli vyjadřuje schopnost materiálu vést tepelnou energii vzhledem ke své schopnosti akumulovat tepelnou energii. Rovnici pro výpočet ukazuje vztah 6.3., kde ρ je hustota [22].

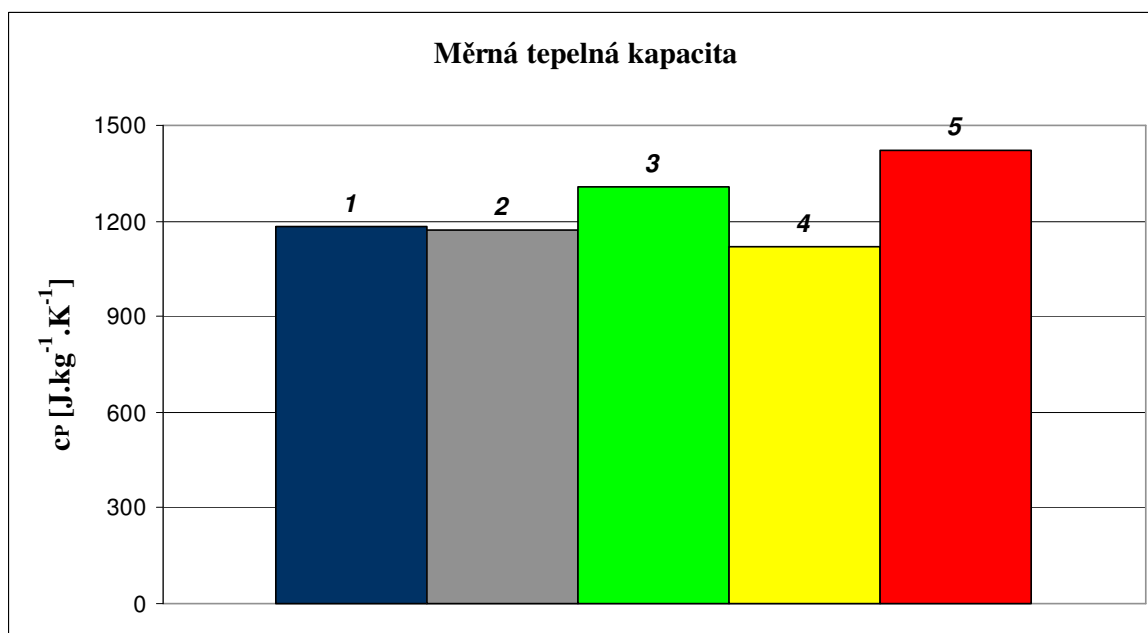
$$\alpha = \frac{k}{c_p \cdot \rho} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]. \quad (6.3.)$$

Výsledky měření jsou přehledně zpracovány v tab. 6.1. a v grafech 6.1. až 6.3. Z grafu č. 6.1., kde je vynesena měrná tepelná kapacita je patrné, že se hodnoty těchto kapacit použitých vzorků příliš nemění. Při porovnání vzorku č. 2 a č. 3 je jejich rozdíl v tepelné kapacitě cca 11% , což je již nad hranicí citlivosti uvedené aparatury. Porovnáním vzorku č. 4 a č. 5 se hodnota liší o cca 27% , což je dostatečně významný rozdíl.

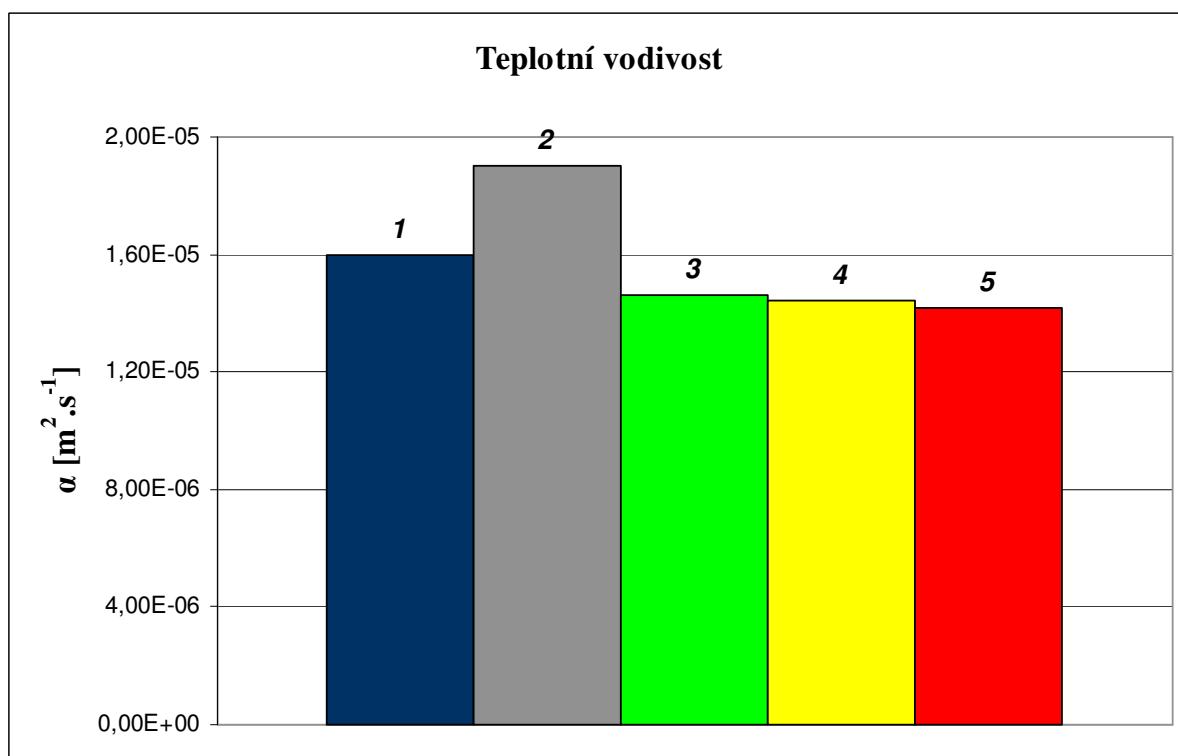
Hodnoty teplotní vodivosti (viz graf 6.2.) se významněji liší jen mezi vzorky č. 1 a č. 2. A to o cca 18 %. Tento rozdíl je tedy významný nad chybami měření. Ostatní hodnoty pro vzorky č. 3 až č. 5 jsou v rámci chyb měření. Tudíž do 8 %.

Co se týče tepelné vodivosti (graf 6.3.), tak jsou výrazné změny mezi vzorky č. 3 a č. 4: 123 %, mezi č. 4 a č. 5: 99 % a č. 1 a č. 2: 47 %. Z výsledků je vidět, že nejvýznamnější změna tepelné vodivosti sousedních vzorků je u č. 3 a č. 4, ale i změna tepelné vodivosti č. 1 a č. 2 či č. 4 a č. 5 je také významná (ale méně než v předcházejícím případě).

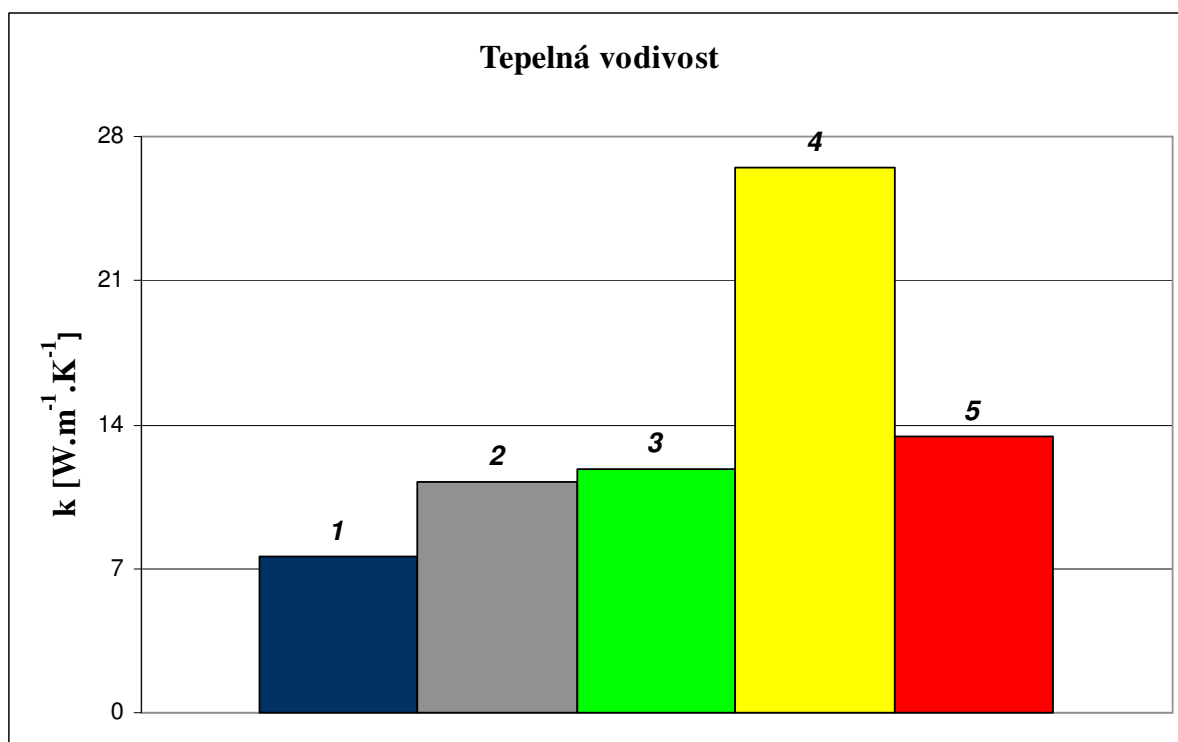
Z uvedené analýzy tedy vyplývá, že z hlediska aplikací s ohledem na tepelné vlastnosti sledovaných materiálů je nejzajímavější vzorek č. 2 a č. 4.



Graf 6.1. Sloupcové zobrazení výsledných měrných tepelných kapacit



Graf 6.2. Sloupcové zobrazení výsledných teplotních vodivostí



Graf 6.3. Sloupcové zobrazení výsledných tepelných vodivostí

Tab. 6.1. Získané hodnoty tepelných vlastností sendvičových struktur i Biottova čísla

	1	2	3	4	5
c_p [J.kg⁻¹.K⁻¹]	1183,10 ± 10,12	1173,30 ± 11,50	1306,10 ± 8,09	1117,50 ± 6,61	1421,80 ± 19,72
P₉₉	(1150,21- 1215,99)	(1135,91- 1210,68)	(1279,82- 1332,38)	(1096,02- 1138,98)	(1357,72- 1485,88)
α [m².s⁻¹]	1,60.10 ⁻⁵ ± 4,40.10 ⁻⁸	1,90.10 ⁻⁵ ± 1,20.10 ⁻⁷	1,46.10 ⁻⁵ ± 5,40.10 ⁻⁸	1,44.10 ⁻⁵ ± 5,30.10 ⁻⁸	1,42.10 ⁻⁵ ± 1,10.10 ⁻⁷
P₉₉	(1,58-1,61) .10 ⁻⁵	(1,86-1,94) .10 ⁻⁵	(1,44-1,47) .10 ⁻⁵	(1,42-1,46) .10 ⁻⁵	(1,39-1,46) .10 ⁻⁵
k [W.m⁻¹.K⁻¹]	7,60 ± 0,05	11,19 ± 0,04	11,84 ± 0,03	26,51 ± 0,07	13,39 ± 0,09
P₉₉	(7,42-7,79)	(11,07-11,31)	(11,74-11,94)	(26,30-26,73)	(13,12-13,67)
Bi	6,58.10 ⁻³	5,16.10 ⁻³	2,75.10 ⁻³	1,26.10 ⁻³	3,67.10 ⁻³

7 ZÁVĚR

Závěrem zhodnotíme splnění cílů této diplomové práce, tak jak byly určeny v zadání. Za prvé byla sepsána literární rešerše, která obsahuje 22 titulů. Z toho je titulů v anglickém jazyce 9. Ve druhé části jsme z dostupných zdrojů analyzovali používané metody měření tepelných vlastností materiálů. Podstatná část textu je věnována popisu měřicí metodiky tepelných vlastností pomocí exponenciálního modelu, který je v práci podrobně popsán i s verifikací jeho platnosti k měření sendvičových struktur.

V závěrečné části jsou uvedeny a zhodnoceny výsledky měření měrné tepelné kapacity, teplotní a tepelné vodivosti pro 5 různých vzorků sendvičů, které byly dodány z firmy *FORM s.r.o.* Během řešení této práce jsem absolvoval i odbornou praxi na fakultě Průmyslových technologií v Púchově, kde jsem se seznámil s další metodou měření tepelných vlastností materiálů. Vzhledem k tomu, že tato metoda vyžaduje poměrně tlusté vzorky, nebylo možné provést srovnávací měření.

Závěrem můžeme konstatovat, že uvedená práce dává zajímavé podněty i pro další výzkum, které se týkají návrhu a konstrukcí sendvičových struktur s „extrémními“ tepelnými parametry. Cíle diplomové práce lze tedy považovat za splněné.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] R. Rothon, *Particulate – Filled Polymer Composites*, ISBN 0-582-08782-1, 1996
- [2] G. W. Ehrenstein, *Polymerní kompozitní materiály*, Scentia, , ISBN 978-80-86960-29-6, 2009
- [3] *Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Composites*, Copyright John Wiley & Sons, 2007
- [4] <http://umi.fs.cvut.cz>
- [5] <http://www.havel-composites.com/clanky/0-/74-Vseobecny-a-zakladny-popis-materialov-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitov.html>
- [6] <http://www.form-composite.com/>
- [7] F. R. Jones, *Handbook of Polymer-Fibre Composites*, ISBN 0-470-23373-7, 1994
- [8] <http://www.5m.cz/en/semipreg-prepreg/>
- [9] Kelly, C. Zweben, *Encyclopedia of Comprehensive Composite Materials*, Vol. 2, Polymer Matrix Composites, ISBN: 0-08-043720-6, 2000
- [10] Materiálové listy firmy FORM s. r. o.
- [11] Ezzahri, Y., Dilhaire, S., Grauby, S., Rampnoux, J. M., Claeys, W., Zhang, Y., Zeng, G., Shakouri, A. (2005). *Study of thermomechanical properties of Si/SiGe superlattices using femtosecond transient thermoreflectance technique*. Applied Physics Letters, 87,(10).
- [12] Parker, W. J., Jenkins, R. J., Butler, C. P., Abbott, G. L. (1961). *Flash method of determination thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity*. Journal of applied physics, 32, (9), 1679-&.
- [13] Jeng, Y. R., Chen, J. T., Cheng, C. Y. (2006). *Thermal contact conductance of coated surfaces*. Wear, 260, (1-2), 159-167.
- [14] Gaal, P. S., Therman, M. A., Stroe, D. E. (2004). *Thermal conductivity measurements using the flash method in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 78 (1), 185-189.
- [15] Košťál, P., Ružiak, I., Jonáš, Z., Kopal, I., Hrehuš, R., Kršková, J. (2010). *Experimental Method for Complex Thermo-mechanical Material Analysis*. Int.J. of Thermophysics, 31, (3), 630-636.
- [16] Košťál, P., Ružiak, I., Jančíková, Z. (2012), Patent NO 303269 CS.
- [17] Akoshima, M., Baba, T. (2005). *Study on a thermal-diffusivity standard for laser flash method measurements*. Int. J. Thermophysics, 26,(1), 1189-1203.

- [18] Čmelík, M., Machonský, L., Burianova, L.: *Úvod do fyzikálních měření*. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2001. ISBN 80-7083-534-6
- [19] Brož, J. et al.: *Základy fyzikálních měření*, I. díl. SPN, Praha 1967.
- [20] Rektorys, K. et al. *Přehled užité matematiky*. SNTL, Praha 1963; 6. vydání: Prometheus, Praha 1995.
- [21] <https://cs.wikipedia.org>
- [22] Příhoda, M., Rédr M. *Sdílení tepla a proudění*. 2. přepracované vydání. Ostrava: VŠB – TUO, 2008. ISBN 978–80–248–1748-4